



Márcio Filipe Gonçalves

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de sistemas de medição interferométrica para a calibração de distanciómetros

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, Professor
Auxiliar, FCT/UNL - DEMI

Co-orientador: Fernanda Saraiva, Responsável do Laboratório de
Comprimento, Instituto Português da Qualidade

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor António Paulo Vale Urgueira
Arguentes:	Prof. Doutor Luís Filipe Galvão Reis Engenheiro Luís Manuel Hipólito Brito
Vogais:	Prof. Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins Dr. ^a Maria Fernanda Leitão Silva Saraiva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Outubro de 2012

Aplicação do desenvolvimento de sistemas de medição interferométrica de distâncias até 50 m à calibração de distanciómetros.

©Márcio Filipe Gonçalves, FCT-UNL, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização deste trabalho, só foi possível graças à colaboração e apoio de um grande número de pessoas, relativamente às quais exprimo os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao orientador, Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins pelos inúmeros conhecimentos científicos transmitidos, não apenas como orientador deste trabalho, como também ao longo de todo do meu percurso académico. Pela sua total disponibilidade, encorajamento e motivação, como também pela revisão do trabalho realizado.

À co-orientadora, Dr.^a Fernanda Saraiva, responsável do Laboratório de Comprimento do Instituto Português da Qualidade, pelo seu apoio, e por ter possibilitado a realização deste trabalho através dum estágio curricular. Pela transmissão de conhecimentos e orientação científica sem a qual não teria sido possível a realização desta dissertação.

Aos restantes membros do Instituto Português da Qualidade, em particular à Eng.^a Sílvia Gentil e à Eng.^a Liliana Eusébio pelo auxílio e partilha de conhecimentos.

Uma palavra de apreço a todos aqueles que comigo, colaboraram e desempenharam funções na Companhia de Apoio de Fogos do Corpo de Fuzileiros da Marinha Portuguesa.

Aos meus amigos, pelo apoio e companheirismo demonstrado ao longo do meu percurso académico, com especial agradecimento à “KOBRASAD” pela vossa amizade.

Um agradecimento muito especial à minha família, pelo suporte incondicional, confiança, compreensão e incentivo demonstrado ao longo deste trabalho, como em todo o meu percurso de vida. O meu agradecimento à Geisa Elmar pelo amor, amizade, força, ajuda e dedicação demonstrada para que eu atingisse os meus objectivos.

Resumo

A rastreabilidade de uma medição é assegurada através da identificação das características metrológicas dos instrumentos de medição, utilizando um processo de calibração. A calibração dos instrumentos de medição é conseguida através da comparação com um padrão de referência.

A presente dissertação tem entre outros, o objectivo de desenvolver um procedimento técnico para a calibração de distanciómetros. Este procedimento é estabelecido a partir da identificação das características metrológicas do instrumento de medição e das referências bibliográficas (manual, normas, ...).

A identificação das especificações metrológicas pode ser obtida durante os processos de calibração do distanciómetro. No processo de calibração determina-se a mensuranda em avaliação.

Devido à evolução científica e tecnológica dos instrumentos de medição, não só os processos de calibração de instrumentos de medição são cada vez mais desenvolvidos, como também os métodos como são realizados estes processos são mais exigentes.

Nesse sentido, desenvolveu-se também na presente dissertação o projecto de um equipamento de medição de longo alcance, com o objectivo de dar resposta aos procedimentos de calibração de novos instrumentos de medição.

O equipamento de medição de longo alcance, conjunto basicamente formado por um sistema laser interferómetro e um banco de ensaios, permitirá ao laboratório de comprimento (LCO) do Instituto Português da Qualidade (IPQ) adquirir valências para a realização de ensaios na calibração de instrumentos de medição com uma gama de medição até 50 m e automatizado.

Palavras-chave

Banco de ensaios *SIP* de 3 m, Banco de ensaios de 50 m, Interferómetro, Distanciómetro, Procedimento técnico de calibração, Cálculo de Incertezas.

Abstract

The traceability of a measurement is assured through the identification of the metrological characteristics of the measuring instruments using a calibration process. The measuring instruments calibration is obtained through the comparison with a reference standard.

The purpose of this dissertation is to develop a technical procedure for the calibration of a laser distance meter. This procedure is established through the identification of the measurement instrument's metrological characteristics and the references (manual, standards, ...).

The identification of the metrological specifications may be obtained during the calibration process of the laser distance meter. In the process of calibration is determined in the evaluation measurand.

Due to scientific and technological developments of measuring instruments, not only the process of calibration of measuring instruments are increasingly developed, as well as the methods are performed these processes are more demanding.

In this sense, also developed in this dissertation, a project of a long bench measuring equipment, how objective to respond to the new calibration procedures for measuring instruments.

The long bench measuring equipment, all basically formed by a laser interferometer and a test bench will allow the length laboratory (LCO) of the Instituto Português da Qualidade (IPQ) to acquire competences for testing calibration instruments measurement with a measuring in a range of a nominal indication interval up to 50 m automated.

Keywords

Test Bench *SIP* with 3 m, Test bench with 50 m, Interferometry, Laser distance meter, Technical procedure of calibration, uncertainties calculus

Índice

Capítulo 1: Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura e Organização da Dissertação.....	3
Capítulo 2: História e Desenvolvimento da Metrologia.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 História da Metrologia	5
2.2.1 O metro.....	7
2.3 Áreas da Metrologia.....	8
2.4 Estrutura da Metrologia em Portugal	9
2.5 Instituto Português da Qualidade	10
2.5.1 Unidade de Metrologia Científica e Aplicada.....	13
2.5.1.1 Sistema de Gestão da Qualidade	15
Capítulo 3: Metodologia para a Calibração de Distanciómetros.....	17
3.1 Introdução	17
3.2 Equipamentos.....	17
3.2.1 Distanciómetro	18
3.2.1.1 Princípio de Funcionamento do Distanciómetro	20
3.2.2 Sistema Laser Interferométricos.....	21
3.2.2.1 Princípio Teórico do Laser Interferométrico.....	22
3.2.2.2 Interferómetro de <i>Michelson</i>	23
3.2.3 Banco de Ensaio	24
3.2.3.1 Banco de Ensaio SIP de 3 m	25
3.2.3.2 Banco de Ensaio de 50 m	25
3.2.4 Outros Equipamentos Utilizados.....	26
3.3 Procedimento Experimental	27
3.4 Medição.....	31
3.5 Erro de Medição.....	32
3.6 Mensuranda	33
Capítulo 4: Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição.....	35
4.1 Introdução	35
4.2 Incerteza de medição.....	35
4.3 Grandeza de Entrada	36
4.4 Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada.....	37
4.4.1 Avaliação de Tipo A da Incerteza-padrão.....	37
4.4.2 Avaliação de Tipo B da Incerteza-padrão	38
4.5 Processos estatísticos de avaliação da Incerteza-Padrão.....	39
4.5.1 Distribuição Normal.....	39

4.5.2	Distribuição Rectangular	40
4.5.3	Distribuição Triangular	41
4.5.4	Distribuição “Forma-de-U”	41
4.6	Cálculo da Incerteza-Padrão da Mensuranda	42
4.7	Incerteza de Medição Expandida	43
4.8	Resultado da Incerteza de Medição.....	44
Capítulo 5: Apresentação e Discussão de Resultados		45
5.1	Introdução	45
5.2	Características do distanciómetro.....	45
5.2.1	Gama de Medição.....	45
5.2.2	Estabilidade do Distanciómetro.....	48
5.3	Avaliação das Grandezas de Entrada X_i com o Banco <i>SIP</i> de 3 m.....	49
5.3.1	Método de Avaliação “Tipo A”.....	49
5.3.1.1	Repetibilidade.....	50
5.3.1.2	Reprodutibilidade	51
5.3.2	Método de Avaliação de “Tipo B”	52
5.3.2.1	Padrão de Referência.....	52
5.3.2.2	Erro do coseno.....	53
5.3.2.3	Resolução de um Dispositivo Afixador.....	54
5.4	Balanço da Incerteza de Medição com o Banco <i>SIP</i> de 3 m.....	55
5.5	Avaliação das Grandezas de Entrada X_i no Banco de 50 m.....	57
5.5.1	Método de Avaliação de “Tipo A” até 30 m.....	57
5.5.1.1	Repetibilidade.....	57
5.5.1.2	Reprodutibilidade	58
5.5.2	Método de Avaliação de Tipo A até 50 m.....	60
5.5.2.1	Repetibilidade.....	60
5.5.2.2	Reprodutibilidade	61
5.5.3	Método de Avaliação de Tipo B.....	63
5.5.3.1	Padrão de Referência.....	63
5.5.3.2	Erro do coseno.....	64
5.5.3.3	Alinhamento do Distanciómetro	66
5.6	Balanço de Incerteza de Medição.....	67
5.7	Incerteza de Medição Expandida	69
5.8	Expressão da Incerteza de Medição e Certificado de Calibração.....	70
Capítulo 6: Projecto do Equipamento de Medição de Longo Alcance		71
6.1	Introdução	71
6.2	Enquadramento do Projecto	71
6.3	Conceptualização de Projecto	72
6.3.1	Especificações de Projecto	72

6.3.2	Solução de Projecto	73
6.3.2.1	Sistema de Suporte/Apoio	74
6.3.2.2	Sistema de Movimentação	79
6.3.2.3	Sistema Óptico	82
6.3.2.4	Sistema de Visualização/Captação de Imagem	83
6.4	Dimensionamento e Projecto de Detalhe	85
6.4.1	Placa de Suporte	87
6.4.2	Guias Lineares.....	88
6.4.3	Sistema de deslizamento	93
6.4.4	Sistema Calha Porta-cabos	94
6.4.5	Accionamento Motorizado.....	94
6.4.6	Mesa Porta Instrumentos de Medição	96
6.4.7	Mesa Reguladora do Rectilismo e Horizontalidade	98
6.4.8	Coluna de Suporte	99
6.5	Controladores Programáveis para Automação e Controlo de Instrumentos.....	100
6.5.1	Plataformas do <i>Software LabVIEW</i> e <i>Hardware</i>	100
6.5.2	Método de Desenvolvimento do <i>Software</i>	102
6.5.2.1	Definição do Problema.....	103
6.5.2.2	Solução do problema.....	103
Capítulo 7: Conclusão e Sugestão para Trabalhos Futuros		107
7.1	Conclusão.....	107
7.2	Sugestão para trabalhos futuros.....	108
Bibliografia		109
Anexo A: Dados recolhidos no banco de ensaio <i>SIP</i> de 3 m		115
Anexo B: Dados recolhidos no banco de ensaio de 50 m		123
Anexo C: Balanço da Incerteza de Medição		139
Anexo D: Certificado de Calibração/Relatório de Ensaio do Distanciómetro		151
Anexo E: Procedimento Técnico da Calibração de Distanciómetros.....		155
Anexo F: Desenhos do Projecto do Equipamento de Medição de Longo Alcance.....		165

Índice de Figuras

Figura 2.1: Estrutura organizacional do BIPM [3].....	6
Figura 2.2: Áreas da metrologia.....	9
Figura 2.3: Sistema Português da Qualidade.....	10
Figura 2.4: Estrutura organizacional do Instituto Português da Qualidade [7]	13
Figura 2.5: Estrutura organizacional da UMCA-LCM	14
Figura 2.6: Exemplo da hierarquia do Sistema de Gestão da Qualidade	15
Figura 3.1: Instrumento de medição: exemplos de distanciómetros	18
Figura 3.2: Distanciómetro <i>Leica DistoTM D2</i>	19
Figura 3.3: Esquema do sistema laser interferométrico concebido durante a elaboração da tese	21
Figura 3.4: Princípio teórico do sistema laser interferométrico [14].....	23
Figura 3. 5: Esquema do interferómetro de <i>Michelson</i>	24
Figura 3.6: Banco de ensaio SIP de 3 m	25
Figura 3.7: Banco de ensaio de 50 m	26
Figura 3.8: Esquema de alinhamento do sistema laser interferométrico.....	28
Figura 3.9: Esquema dos movimentos relativos da mesa universal	28
Figura 3.10: Esquema do alinhamento do distanciómetro	29
Figura 3.11: Esquema do banco de ensaio de 50 m do desalinhamento	30
Figura 3.12: Esquema do banco de ensaio de 50 m alinhado.....	31
Figura 4. 1: Distribuição de probabilidade normal.....	40
Figura 4. 2: Distribuição de probabilidade rectangular	40
Figura 4. 3: Distribuição de probabilidade triangular	41
Figura 4. 4: Distribuição de probabilidade em “Forma-de-U”	42
Figura 5. 1: Verificação do erro do coseno [13].....	53
Figura 5. 2: Erro de medição em função dos valores nominais avaliados	59
Figura 5. 3: Variação do erro de medição com o respectivo valor nominal.....	63
Figura 6. 1: Equipamento de medição de longo alcance	74
Figura 6. 2: Identificação e constituição do sistema de suporte/Apoio	74
Figura 6.3: Mesa reguladora do rectilismo e da horizontalidade	75
Figura 6. 4: Componentes integrantes da mesa reguladora do rectilismo e da horizontalidade..	76
Figura 6. 5: Mesa porta instrumentos de medição.....	76
Figura 6. 6: Veios dos Guias Lineares	77
Figura 6. 7: Mesa de suporte dos componentes ópticos fixos	78
Figura 6.8: Calha porta-cabos E 6.29.....	78
Figura 6.9: “Super guia” em alumínio.....	78
Figura 6. 10: Identificação e constituição do sistema de movimentação	79
Figura 6. 11: Sistema esférico comum [23].....	80

Figura 6. 12: Sistema deslizante <i>Drylin Igus</i> [23].....	80
Figura 6. 13: Sistema de deslizamento.....	80
Figura 6. 14: Placa de suporte do sistema de movimentação.....	81
Figura 6. 15: Accionamento motorizado.....	82
Figura 6. 16: Unidade laser do sistema laser interferométrico <i>HP 5528^a</i>	83
Figura 6. 17: Identificação e constituição do sistema de visualização/captação de imagem	83
Figura 6.18: Estereomicroscópio <i>Stemi 2000</i> da <i>Carl Zeiss</i>	84
Figura 6. 19: Fonte de luz fria <i>Leica L2</i>	84
Figura 6. 20: Câmara digital <i>NI 1776 C Smart Camera</i>	85
Figura 6. 21: Distribuição da tensão equivalente de <i>Von Mises</i> na placa de suporte	88
Figura 6. 22: Distribuição da deformação na placa de suporte	88
Figura 6. 23: Varão simplesmente apoiado submetido a duas cargas concentradas (simplificação).....	89
Figura 6. 24: Método da sobreposição	89
Figura 6. 25: Viga simplesmente apoiada submetida a uma carga concentrada	97
Figura 6. 26: Distribuição da tensão equivalente de <i>Von Mises</i> da mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade	98
Figura 6. 27: Distribuição da deformação da placa da mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade	98
Figura 6. 28: Controlador <i>NI cRIO-9076</i>	101
Figura 6. 29: <i>Drive NI 9512 C Series</i>	101
Figura 6. 30: Cabo <i>NI GPIB-USB-HS</i>	102
Figura 6. 31: Fluxograma do algoritmo da solução do problema de automação do projecto ...	106
Figura E.1: Alinhamento do sistema laser interferométrico <i>HP</i>	157
Figura E.2: Alinhamento do distanciómetro	158
Figura E. 3: Verificação do erro do coseno.....	159

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Características técnicas do distanciômetro <i>Leica DistoTM D2</i>	19
Tabela 4. 1: Factores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efectivos ν_{ef}	44
Tabela 5.1: Alcance de medição mínimo	46
Tabela 5.2: Erro de medição para o alcance de medição mínimo	47
Tabela 5.3: Avaliação da estabilidade do distanciômetro	48
Tabela 5.4: Valores de repetibilidade até ao valor nominal $L=3000$ mm.....	50
Tabela 5. 5: Valores de reprodutibilidade até ao valor nominal $L=3000$ mm	51
Tabela 5. 6: Avaliação da incerteza-padrão para o padrão de referência <i>HP</i>	53
Tabela 5.7: Avaliação da incerteza-padrão para erro do coseno para os valores nominal $L=3000$ mm	54
Tabela 5. 8: Balanço da incerteza de medição para o banco de ensaio <i>SIP</i> de 3 m	56
Tabela 5. 9: Valores de repetibilidade até ao valor nominal $L=30000$ mm.....	58
Tabela 5.10: Valores de reprodutibilidade até ao valor nominal $L=30000$ mm	59
Tabela 5. 11: Valores de repetibilidade até ao valor nominal $L=50000$ mm.....	61
Tabela 5. 12: Valores de reprodutibilidade até ao valor nominal $L=50000$ mm	62
Tabela 5. 13: Avaliação da incerteza-padrão para o padrão de referência <i>SH</i>	64
Tabela 5.14: Avaliação da incerteza-padrão para erro do coseno até ao valore nominal $L=50000$ mm	65
Tabela 5.15: Avaliação da incerteza-padrão para o alinhamento do distanciômetro	67
Tabela 5. 16: Balanço da incerteza de medição final	68
Tabela 5. 17: Incerteza de medição expandida.....	69
Tabela 5. 18: Apresentação dos resultados no certificado de calibração /relatório de ensaio.....	70
Tabela 6. 1: Características da camara digital <i>NI 1776 C Smart Camera</i> [24]	85
Tabela 6. 2: Características geométricas e massa dos componentes solidários ao carro.....	86
Tabela 6. 3: características da liga de alumínio 5052.....	87
Tabela 6. 4: Resultados da equação da elástica para calcular o momento de inercia.....	91
Tabela 6. 5: Resultado da equação da elástica para a flecha do varão $\varnothing = 30$ mm	92
Tabela 6. 6: Resultado da equação da elástica para a flecha do varão $\varnothing = 40$ mm	93
Tabela 6. 7: Características da chumaceira alinear aberta [23]	94
Tabela 6. 8: Dimensões da calha E 6.29	94
Tabela 6. 9: dimensionamento da roda para o accionamento do carro	95
Tabela 6. 10: Resultados do dimensionamento do motor	96
Tabela 6. 11: Características técnicas do motor <i>stepper Nema 23</i> [24]	96
Tabela 6. 12: Resultado da força máxima que mesa porta instrumentos de medição pode suportar.....	97

Tabela 6. 13: Resultados da carga crítica da encurvadura dos fusos reguladores da horizontalidade	99
Tabela 6. 14: dimensões das colunas de suporte	100
Tabela A.1: Valores de indicação do distanciômetro adquiridos com intervalos de tempo.....	115
Tabela A.2: Valores de repetibilidade adquiridos no banco <i>SIP</i> de 3 m.....	116
Tabela A.3: Valores de reprodutibilidade adquiridos no banco <i>SIP</i> de 3 m	119
Tabela B.1: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m.....	123
Tabela B.2: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m.....	126
Tabela B. 3: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m.....	128
Tabela B.4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m.....	131
Tabela C.1: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=5000$ mm	139
Tabela C. 2: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=10000$ mm	140
Tabela C. 3: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=15000$ mm	141
Tabela C. 4: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=20000$ mm	142
Tabela C. 5: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=25000$ mm	143
Tabela C. 6: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=30000$ mm	144
Tabela C. 7: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=35000$ mm	145
Tabela C. 8: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=40000$ mm	146
Tabela C. 9: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=45000$ mm	147
Tabela C. 10: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=50000$ mm	148

Lista de Abreviaturas

LCO	Laboratório de comprimento
IPQ	Instituto Português da Qualidade
UMCA-LCM	Unidade de Metrologia Científica e Aplicada-Laboratório Central de Metrologia
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CIPM	Comité Internacional de Pesos e Medidas
SPQ	Sistema Português da Qualidade
ONS	Organismos de Normalização Sectorial
SI	Sistema Internacional
EURAMET	<i>European Association of National Metrology Institutes</i>
NP	Norma Portuguesa
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
MRC	Materiais Referência Certificados
HP	<i>Hewlett-Packard</i>
SH	<i>Spindler & Hoyer</i>
SIP	<i>Société Genevoise d'Instruments de Physique</i>
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
VHDL	<i>VHSIC Hardware Description Language</i>
VHSIC	<i>Very High Speed Integrated Circuits</i>

Símbolos

D	Distância
c	Velocidade de propagação do feixe laser
t	Tempo de percurso
f_1	Frequência do feixe laser 1
f_2	Frequência do feixe laser 2
λ	Comprimento de onda
Δf	Variação de frequência
v	Velocidade de propagação do feixe
L	Valor do deslocamento do cubo retroreflector móvel
dt	Função do tempo
G_1	Divisor de feixe
M_1	Espelho 1
M_2	Espelho 2
e	Erro de medição
x_i	Valor medido de uma grandeza
x_{ref}	Valor de referência
Y	Grandeza de saída
X_i	Grandeza de entrada
f	Função modelo
\bar{q}	Média aritmética das observações
q_j	Observações
$s(q)$	Desvio-padrão experimental
$u(x_i)$	Incerteza-padrão
x_i	Estimativa da grandeza de entrada
a_+	Limite superior
a_-	Limite inferior

$u^2(x_i)$	Quadrado da incerteza-padrão
$f(x, \mu, \sigma)$	Função de densidade de probabilidade
μ	Média aritmética
σ	Desvio-padrão
a	Valor da incerteza
k	Factor de expansão
$f(x)$	Função de densidade da probabilidade
y	Estimativa da grandeza de saída
$u_i(y)$	Contribuição para a incerteza-padrão associada à mensuranda
c_i	Coefficiente de sensibilidade
$r(x_i, x_k)$	Coefficiente de covariância
U	Incerteza de medição expandida
$u(y)$	Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída
v_{ef}	Número de graus de liberdade efectivos
Y	Resultado de medição
y	Valor medido
L	Valor nominal
$s(e)$	Desvio-padrão
\bar{e}	Média dos valores de indicação
$u(ref_{HP})$	Incerteza-padrão associada ao padrão de referência
$u(cos)$	Incerteza-padrão associada ao erro do coseno
d	Diferença entre os dois feixes que incidem na unidade laser
D	Distância percorrida pelo cubo retrorreflector móvel
r	Resolução do dispositivo afixador
$u(r)$	Incerteza-padrão associada à estimativa da resolução de um dispositivo afixador
$u(q)$	Incerteza-padrão associada às condições de repetibilidade
$u(e)$	Incerteza-padrão associada às condições de reprodutibilidade

d_{dist}	Distância do distanciómetro à placa alvo
$u(al_{i_{dist}})$	Incerteza-padrão associada ao alinhamento do distanciómetro
$M(x)$	Momento flector
E	Módulo de elasticidade longitudinal
I	Momento de inércia
$\frac{dy}{dx}$	Deslocamento angular
y	Flecha
d	Diâmetro mínimo
F_a	Força de atrito
μ	Coefficiente de atrito
F_N	Força Normal
B	Binário mínimo
r	Raio
a	Avanço
l	Comprimento
P_{cr}	Carga critica
b	Largura
h	Altura

Capítulo 1: Introdução

A metrologia é a ciência da medição e suas aplicações [1].

Na era da globalização, a metrologia enfrenta vários desafios, fruto do constante aumento da competitividade em actividades tais como: indústria, comércio, saúde e segurança. A metrologia tem um papel importante na regulamentação de áreas como a saúde e a segurança.

Devido a factores económicos, cada vez mais empresas e instituições estatais têm necessidade de elevar os seus padrões de qualidade. Com intenção de responder adequadamente a alguns dos desafios que são criados com a implementação no mercado de novos instrumentos de medição, pretende-se desenvolver com a presente dissertação um novo procedimento de controlo metrológico, possibilitando um novo serviço aos clientes do IPQ.

A concepção de novos procedimentos de calibração metrológico, assim como dos meios com que este deverá ser realizado, é de grande importância para conhecer a exactidão dos instrumentos de medição.

A exactidão dos instrumentos de medição é fundamental no controlo de produtos e serviços, para a realização do controlo de qualidade, envolvendo custos bastante consideráveis nas medições da produção de bens.

1.1 Enquadramento

Os sistemas de medição são cada vez mais desenvolvidos. Devido aos grandes avanços tecnológicos, tem sido possível o desenvolvimento de novos instrumentos de medição de grande adaptabilidade a diversos tipos de sectores de actividade, com a preocupação de um bom desempenho de exactidão de medição, com menor utilização de recursos humanos e a aplicação em segurança.

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Comprimento (LCO) da Unidade de Metrologia Científica e Aplicada – Laboratório Central de Metrologia (UMCA-LCM) do Instituto Português da Qualidade (IPQ). A primeira parte deste trabalho teve como objectivo conhecer os instrumentos utilizados na medição de longo alcance. As características metrológicas dos distanciómetros foram analisadas em pormenor, pois foram os equipamentos sobre os quais foi desenvolvido o procedimento de calibração.

A calibração é a operação que, em condições especificadas, estabelece a relação entre os valores da grandeza com as incertezas de medição provenientes de padrões e as indicações correspondentes com incertezas de medição associadas e, num segundo passo, usa esta

informação para estabelecer uma relação para obter o resultado de medição de uma indicação [1].

Os laboratórios devem exercer a sua actividade utilizando os meios tecnológicos que lhes permita estar na vanguarda da inovação. A presente dissertação procura ir ao encontro da implementação do estado-da-arte no que diz respeito ao estabelecimento do processo/método de calibração de distanciómetros. Na segunda parte deste trabalho apresenta-se a concepção e o desenvolvimento de um projecto que permitirá ao LCO a implementação do banco de ensaio de medição até 50 m, alargando a capacidade actualmente presente no banco de ensaios de 3 m.

O projecto também inclui a automatização do processo para adquirir valências na realização prática dos ensaios de controlo metrológico de outros instrumentos, nomeadamente de medidas materializadas de comprimento de longo alcance.

1.2 Objectivos

A actual dissertação, intitulada *Aplicação do desenvolvimento de sistemas de medição interferométrica de distâncias até 50 m à calibração de distanciómetros* está dividida em duas partes diferentes.

A primeira parte tem como objectivo o desenvolvimento de um procedimento de calibração de distanciómetros e a consequente avaliação da incerteza expandida.

Considerando toda a metodologia associada à calibração de instrumentos de medição, elaborou-se um planeamento experimental. A identificação das características do instrumento de medição em estudo o distanciómetro, permitiu o desenvolvimento do método para a sua calibração.

A segunda parte respeita ao estudo e desenvolvimento de um sistema de apoio, movimentação e alinhamento de um carro motorizado, movimentado por controlo remoto, a utilizar no banco de calibração para medição de distâncias até 50 m.

O projecto do banco de calibração de 50 m realizou-se a partir da identificação dos requisitos e especificações de equipamentos de medição de longo alcance e do procedimento de calibração dos mesmo, com o objectivo de definir as soluções construtivas a incluir no projecto, bem como, a selecção e dimensionamento do equipamento a utilizar na construção do banco de ensaio.

1.3 Estrutura e Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos de acordo com a separação das metodologias propostas e o enquadramento das mesmas por temas. No sentido de evidenciar o desenvolvimento da elaboração da tese, os capítulos, são descritos de uma forma sucinta.

O capítulo 1, denominado de *Introdução*, apresenta o enquadramento para a realização do tema proposto: define ainda os objectivos e apresenta a estrutura e organização da dissertação.

O capítulo 2, designado de *História e desenvolvimento da metrologia* dá a conhecer informações históricas relevantes sobre o desenvolvimento da metrologia, com particular relevo para a evolução da definição do metro. Neste capítulo é feita também uma descrição da estrutura da metrologia e da Qualidade em Portugal, identificando instituições e laboratórios responsáveis pela actuação metrológica no país e nestas áreas científicas.

O capítulo 3, chamado *Metodologia para a calibração de distanciómetros* contempla a descrição teórica de funcionamento dos equipamentos utilizados no processo experimental de calibração de instrumentos de medição, nomeadamente de distanciómetro e o procedimento experimental utilizado para a realização das medições.

O capítulo 4, nomeado *Princípios da avaliação de incertezas de medição* descreve os princípios e requisitos para a avaliação da incerteza de medição na calibração de instrumentos de medição e a forma como se deve expressar os resultados de medição nos certificados de calibração.

O capítulo 5, intitulado *Apresentação e discussão de resultados*, contém o tratamento estatístico dos resultados experimentais obtidos em laboratório e a descrição da influência dos instrumentos de medição nos resultados obtidos. Apresenta ainda a avaliação da incerteza de medição através da aplicação da teoria apresentada no capítulo 4. Inclui também a apresentação dos respectivos resultados de medição a expressar no certificado de calibração.

O capítulo 6, denominado *Projecto do Equipamento de medição de longo alcance* apresenta a conceptualização do projecto em função dos seus requisitos, assim como a descrição do projecto de detalhe do sistema de medição.

O capítulo 7, designado de *Conclusões e sugestão para trabalhos futuros* resume as conclusões do trabalho realizado com a descrição das acções desenvolvidas. É proposto um procedimento para a validação do método estabelecido no procedimento técnico de calibração de distanciómetros desenvolvido neste trabalho, além de sugestões de desenvolvimento para trabalhos futuros.

Capítulo 2: História e Desenvolvimento da Metrologia

2.1 Introdução

O progresso científico e tecnológico, a intensa competitividade industrial e económica, obriga a que nos dias de hoje tenham de existir técnicas e procedimentos metrológicos que dêem capacidade de resposta a novos desafios tanto por parte das empresas como dos próprios países.

Este capítulo propõe-se a descrever a história da evolução da metrologia referenciando datas e acontecimentos importantes, com especial ênfase nos acontecimentos ocorridos em Portugal, e com uma descrição histórica da evolução da definição do metro.

Este capítulo contém também uma explicação das políticas internas de Portugal no que se refere à competência, responsabilidade e estrutura da metrologia.

2.2 História da Metrologia

Desde o início da humanidade que os *pesos e medidas* tiveram grande importância na vida quotidiana, existindo necessidade de padronizar as medições em sectores como a construção de armas usadas para caçar e para protecção, na recolha e troca de alimentos e vestuário, e na divisão de território [2].

Em Portugal os padrões de *pesos e medidas* têm início com a própria origem do país, no século XII, não existindo ruptura com os padrões das civilizações então existentes no território, sistemas de medida Romano e Árabe. Após a consolidação do estado, os *pesos e medidas* foram estabelecidos como padrões, através de instrumentos legais e instituições constituindo assim ferramentas de jurisdição real de controlo metrológico [2].

A primeira lei nacional da metrologia foi criada a 26 de Dezembro de 1253 com o nome de Lei da almotaxaria, sendo o primeiro marco histórico estrutural e uniformizador, que definiu as unidades legais, o controlo metrológico, a autoridade competente e foram adoptados como referência os padrões de Coimbra, embora os padrões locais continuaram em uso dando origem a conflitos comerciais [2].

Ao longo dos anos, e devido à intensificação das trocas comerciais, foi necessário realizar diversas reformas, passando pela primeira tentativa de uniformização nacional dos *pesos e medidas*, decisão tomada nas Cortes de Elvas no Reinado de D. Pedro I em 1361 [2].

Em 1488, no reinado de D. João II, devido à importância do crescimento das trocas comerciais e internacionalização dos *pesos e medidas*, adoptou-se o “marco” de Colónia como padrão do peso, que era utilizado na Europa de uma forma geral [2].

Com a intenção de clarificar os sistemas de unidades utilizados no sector comercial foi adoptado no reinado de D. Manuel I, as Ordenações Manuelinas, em 1499, ficando definidos os múltiplos e submúltiplos dos valores em relação à unidade padrão [2].

No reinado de D. Sebastião, a 26 de Janeiro de 1575, uma importante reforma ocorreu nas unidades de volume e nas unidades definidas pelas Ordenações Manuelinas: a definição de um novo sistema para os produtos secos. O êxito desta reforma é destacado nos volumes, tanto para líquidos como para secos, sendo proibidas quaisquer outras unidades de volume [2].

Devido à influência das sociedades europeias, não esquecendo as unidades portuguesas tradicionais, adoptou-se nova reforma no reinado de D. João VI, sendo o sistema de unidades definido, obedecendo ao princípio decimal e estabelecendo a equivalência da unidade de volume às de comprimento e de peso [2].

O Sistema Métrico, aprovado em 1791 pela Assembleia Nacional Francesa, foi implementado por Portugal, em 1852, com a respectiva entrada em vigor no prazo de 10 anos [2].

Na ocasião da Exposição Universal de Paris, em 1867 foi criado o *Comité dos Pesos e Medidas e da Moeda*, com o objectivo de uma maior uniformização das medidas. Em 1875, o governo francês convocou a Conferência Diplomática do metro, e a 20 de Maio do mesmo ano dezassete países assinaram a Convenção do metro [2].

A convenção do metro é um tratado que criou o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), uma organização intergovernamental sob a autoridade da *Conferência Geral de Pesos e Medidas* (CGPM) e supervisão do *Comité Internacional de Pesos e Medidas* (CIPM), que actualmente é composto por 55 estados-membros. A sua estrutura organizacional (Figura 2.1) é constituída por diversas comissões consultivas e grupos de trabalho [3].

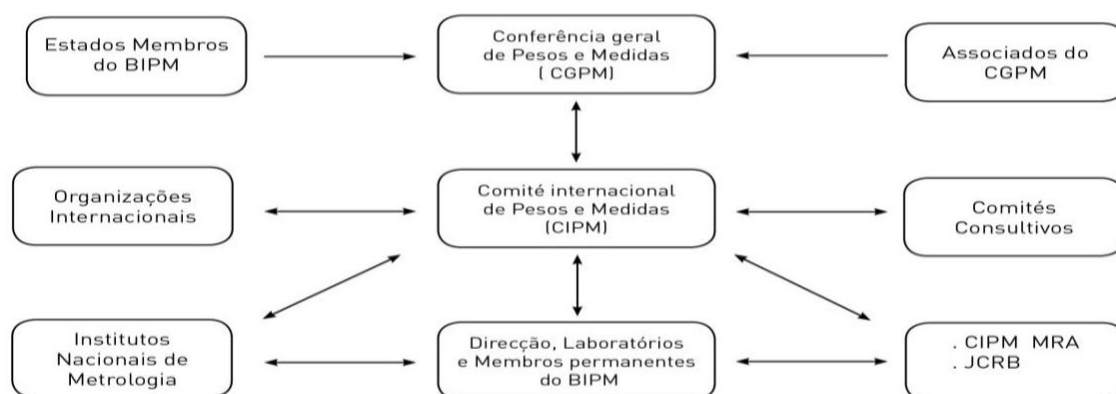


Figura 2.1: Estrutura organizacional do BIPM [3]

2.2.1 O metro

A primeira definição do metro: “igual à décima milionésima parte de um arco dum meridiano terrestre”, teve como ponto de partida o trabalho realizado na medição do meridiano terrestre entre Dunquerque e Barcelona. Com base nestas medições, a realização prática da definição do metro foi feita através do artefacto “*mètre des Archives*”, como sendo a distância entre topos de uma barra de secção rectangular de platina forjada [2].

Posteriormente a *Comissão Internacional do Metro* adoptou uma nova forma de realização do metro, passando a ser a distância entre dois traços, marcados em duas zonas perto das respectivas extremidades, de polimento especular, no plano de fibras neutras de uma barra de platina, irradiada a 10%, com secção em X, distância essa de comprimento igual à do “*mètre des Archives*” [2].

Em 1927 alterou-se o processo de medição a efectuar no mesmo padrão materializado do metro, mas com o procedimento de medição: “A unidade de comprimento é o metro, definido pela distância, a 0°, dos eixos de dois traços médios marcados na barra de platina irradiada depositada no *Bureau International des poids et Mesures* (BIPM), e declarada Protótipo do metro pela 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), estando esta régua submetida à pressão atmosférica normal e suportada por dois roletes de pelo menos um centímetro de diâmetro, situados geometricamente num mesmo plano horizontal e à distância de 571 mm entre si” [2].

Os progressos registados em vários ramos da ciência, nomeadamente na espectroscopia e física atómica, permitiu separar e seleccionar fontes espectrais de um átomo pesado de massa atómica, a temperatura mais baixa possível para reduzir a dispersão por efeito Doppler, permitindo assim, definir-se no ano de 1960 “o metro é o comprimento igual a 1650763,73 comprimentos de onda no vácuo da radiação correspondente à transição entre os níveis 2p₁₀ e 5d₅ do átomo de cripton 86” [2].

Com o estudo da radiação laser, maior estabilidade da radiação, melhor reprodutibilidade, existiu a necessidade de alterar a definição de metro, do qual se adoptou a definição actual encontrando-se ligada ao valor da constante fundamental e exacta velocidade da luz. Em 1983 surge a definição actual “o metro é o comprimento do trajecto percorrido pela luz, no vazio, durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 do segundo” [2].

2.3 Áreas da Metrologia

A metrologia abrange vários sectores de aplicação, sendo necessário um conhecimento vasto em diversos campos, tais como a matemática, estatística, física, química, qualidade e informática.

Nos dias de hoje podemos ver constantemente como a metrologia está presente na sociedade, através dos diferentes sectores da actividade económica.

Para responder a todas as diferentes aplicações, a Metrologia divide-se em diferentes áreas de actividade e responsabilidade (Figura 2.2), com as seguintes atribuições principais:

A *Metrologia Científica* lida com a organização e desenvolvimento de medidas padrão e a sua manutenção. Realiza as unidades de medida a partir da definição, recorrendo a ciências, bem como às constantes físicas fundamentais, desenvolvendo, mantendo e conservando os padrões de referência. Actua a nível da mais alta exactidão e incerteza, sendo independente de outras entidades em termos de rastreabilidade. A garantia dos valores obtidos assenta fortemente em exercícios de comparação interlaboratorial com outros laboratórios primários [4].

A *Metrologia Científica* está dividida em sete grandes bases científicas de conhecimento diferentes:

- Comprimento;
- Massa;
- Tempo;
- Corrente eléctrica;
- Temperatura termodinâmica;
- Quantidade de matéria;
- Intensidade da luz [3];

A *Metrologia Aplicada* ou *Industrial* assegura o funcionamento adequado das medições utilizadas na indústria, nos processos de produção e transformação de bens, como na demonstração da qualidade metrológica em organizações com sistemas de qualidade certificados, de forma a garantir a qualidade de vida dos cidadãos e da investigação científica [4].

A *Metrologia Aplicada* é constituída pelas seguintes actividades principais:

- Calibração de padrões e instrumentos de medição;
- Organização de comparações interlaboratoriais;

- Participação nos sistemas de acreditação nacionais,

A *Metrologia Legal* abrange todas as actividades e requisitos legais na regulamentação de medições, unidades de medida, instrumentos de medição e métodos de medição, sendo estas actividades reguladas pelas autoridades governamentais, a fim de assegurar a credibilidade dos resultados de medição. A *Metrologia Legal* não é uma disciplina específica da metrologia, apenas utiliza a *Metrologia Científica* para obter referências apropriadas de rastreabilidade [5].

A *Metrologia Legal* é constituída por quatro actividades principais:

- Criação de requisitos legais metrológicos;
- Avaliação da conformidade dos regulamentos em produtos e actividades;
- Supervisão e controlo da regulamentação em produtos e actividades;
- Proporcionar as infra-estruturas necessárias à rastreabilidade das medições e instrumentos de medida [5];

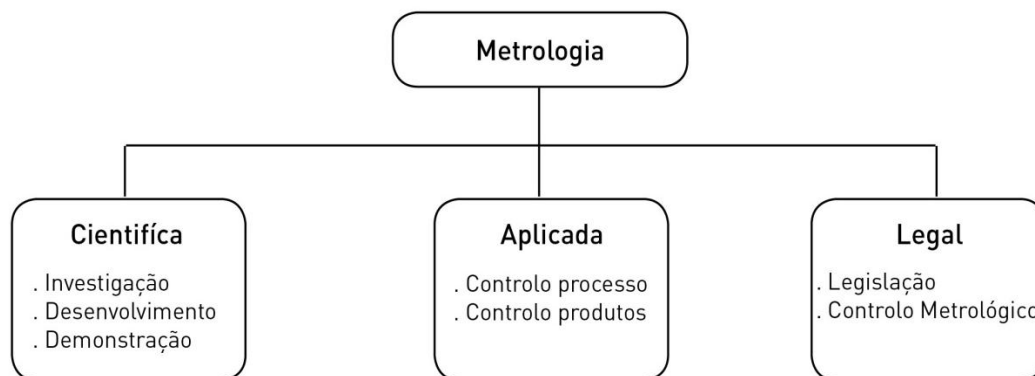


Figura 2.2: Áreas da metrologia

2.4 Estrutura da Metrologia em Portugal

Em Portugal a Metrologia está integrada no Sistema Português da Qualidade (SPQ) criado em 1983 pelo Decreto-Lei nº 165/83 sendo então denominado Sistema Nacional de Gestão da Qualidade. Ao longo dos anos o SPQ passou por várias alterações até o ano de 2007, aquando foi publicado o Decreto-Lei nº 142/2007.

O SPQ assume uma importante relevância ao nível da economia interna e da competitividade internacional, através dum conjunto de entidades e organizações, que dinamizam a qualidade e asseguram a coordenação dos três subsistemas (Figura 2.3): a normalização, a metrologia e a qualificação.

O *Subsistema da Normalização* é o subsistema do SPQ que enquadra as actividades de elaboração de normas e outros documentos de carácter normativo de âmbito nacional, europeu e internacional [6].

O *Subsistema da Metrologia* é o subsistema do SPQ que garante o rigor e a exactidão das medições realizadas, assegurando a sua comparabilidade e rastreabilidade, a nível nacional e internacional, e a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões das unidades de medida [6].

O *Subsistema da Qualificação* é o subsistema do SPQ que enquadra as actividades da acreditação, da certificação e outras de reconhecimento de competências e de avaliação da conformidade, no âmbito do SPQ [6].

O SPQ tem como objectivo o desenvolvimento da qualidade, da inovação, factores determinantes na competitividade, indispensáveis ao crescimento sustentado da economia [6].

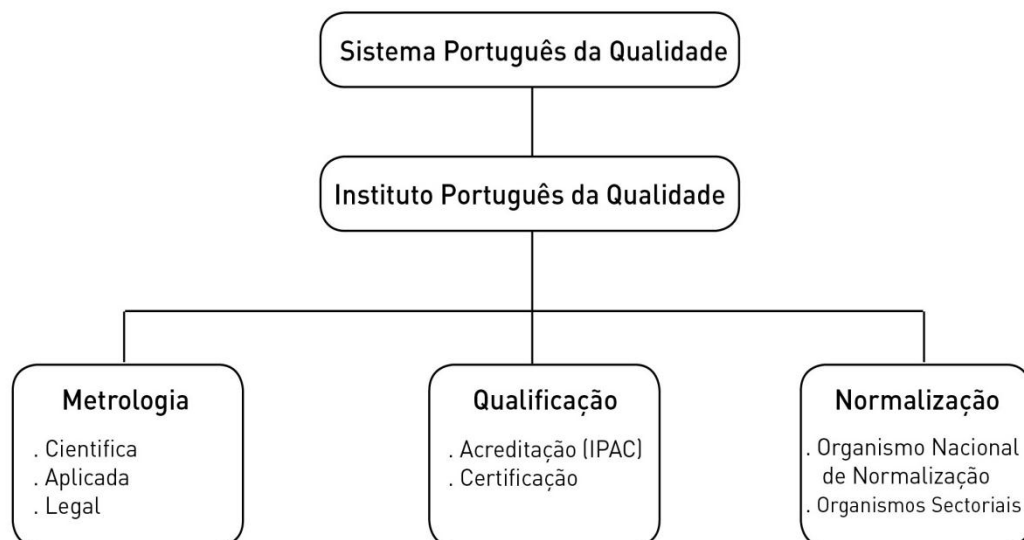


Figura 2.3: Sistema Português da Qualidade

2.5 Instituto Português da Qualidade

O Instituto Português da Qualidade (IPQ) é um instituto público, dotado de personalidade jurídica, com autonomia financeira, administração e património próprio, do qual prossegue atribuições do Ministério da Economia e da Inovação (actual Ministério da Economia e Emprego), como disposto no Decreto-Lei nº 142/2007 de 27 de Abril [6].

O IPQ tem por missão a coordenação do SPQ e de outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei, a promoção e a coordenação de actividades que visam contribuir para demonstrar a credibilidade da acção dos agentes económicos, bem como o

desenvolvimento das actividades inerentes à sua função de laboratório nacional de metrologia [6].

São atribuições do IPQ enquanto organismo nacional coordenador do SPQ, Organismo Nacional de Normalização e Instituição Nacional de Metrologia:

- Gerir, coordenar e desenvolver o SPQ, numa perspectiva de integração de todas as componentes relevantes para a melhoria da qualidade de produtos, de serviços e de sistemas da qualidade e da qualificação de pessoas;
- Promover o desenvolvimento do SPQ, com vista ao incremento da qualidade contribuindo para o aumento da produtividade, competitividade e inovação em todos os sectores públicos e privados da sociedade portuguesa;
- Garantir e desenvolver a qualidade através do estabelecimento de protocolos e parcerias estratégicas com entidades públicas, privadas e da economia social, bem como com infra-estruturas científicas e tecnológicas que, voluntariamente ou por inerência de funções, congreguem esforços para definir princípios e meios que tenham por objectivo padrões de qualidade;
- Promover e dinamizar comissões sectoriais e outras estruturas da qualidade integradas no SPQ, preparando e gerindo o calendário das respectivas acções, encontros e reuniões;
- Instituir as marcas identificadoras do SPQ e assegurar a respectiva gestão;
- Garantir a realização e dinamização de prémios de excelência, como forma de reconhecimento e afirmação das organizações;
- Promover e desenvolver acções de formação e de apoio técnico no domínio da qualidade, designadamente, no âmbito da qualificação, da normalização e da metrologia;
- Desenvolver actividades de cooperação e de prestação de serviços a entidades nacionais e estrangeiras interessadas no domínio da qualidade;
- Propor ao membro do Governo da tutela medidas conducentes à definição de políticas nacionais relativas ao SPQ no âmbito da normalização, qualificação e metrologia, nos domínios voluntário e regulamentar;
- Promover a elaboração de normas portuguesas, garantindo a coerência e actualidade do acervo normativo nacional, e promover o ajustamento de legislação nacional sobre produtos às normas da União Europeia;

- Qualificar e reconhecer como organismos de normalização sectorial (ONS) as entidades públicas ou privadas nas quais o IPQ, I. P., delegue funções de normalização técnica em sectores de actividade específicos;
- Coordenar e acompanhar os trabalhos de normalização nacional desenvolvidos no âmbito da rede de organismos de normalização sectorial (ONS), comissões técnicas de normalização e outras entidades qualificadas no âmbito do SPQ;
- Assegurar a representação de Portugal como membro das organizações de normalização europeias e internacionais e as obrigações daí decorrentes, nomeadamente, a participação nos respectivos trabalhos, a promoção do inquérito público, a votação, difusão e integração das normas no acervo normativo nacional e a sua promoção e venda;
- Gerir o sistema de notificação prévia de regulamentos técnicos e de normas, no âmbito da União Europeia e da Organização Mundial de Comércio, de acordo com a legislação aplicável;
- Assegurar o cumprimento dos procedimentos das directivas comunitárias no que diz respeito à qualificação, notificação à Comissão Europeia e manutenção actualizada da base de dados dos organismos notificados no âmbito de cada directiva;
- Acompanhar iniciativas e programas comunitários que tenham implicações no seu âmbito de actividade;
- Assegurar a implementação, articulação, inventariação de cadeias hierarquizadas de padrões de medida e promover o estabelecimento de redes de laboratórios metrológicos acreditados;
- Gerir o laboratório nacional de metrologia, assegurando a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida e a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI), promovendo a disseminação dos valores das unidades SI no território nacional;
- Assegurar e gerir o sistema de controlo metrológico legal dos instrumentos de medição, reconhecer entidades competentes para o exercício delegado desse controlo e coordenar a rede por elas constituída, garantindo a efectiva cobertura a nível nacional;
- Assegurar a representação de Portugal como membro das organizações de metrologia europeias e internacionais e as obrigações daí decorrentes;
- Gerir o Museu de Metrologia e promover a recolha, preservação, estudo e divulgação do espólio metrológico com interesse histórico [6];

O IPQ através da aprovação da portaria nº 888/2010, de 13 de Setembro, e dos estatutos aprovados pela portaria nº 540/2007, de 30 de Abril, é estruturado pela organização interna do qual dispõe das unidades orgânicas nucleares previstas nos estatutos, podendo ainda criar unidades orgânicas flexíveis, contendo o seguinte organograma [7] (Figura 2.4).

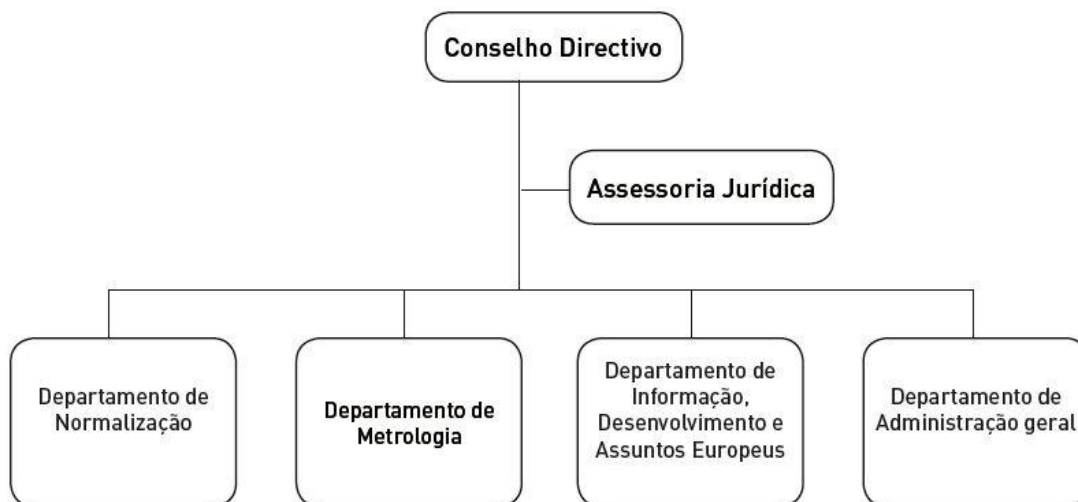


Figura 2.4: Estrutura organizacional do Instituto Português da Qualidade [7]

2.5.1 Unidade de Metrologia Científica e Aplicada

O Departamento de Metrologia do IPQ é responsável pelo funcionamento do Subsistema de Metrologia, com o apoio do conjunto das unidades laboratoriais nacionais. A metrologia científica e aplicada do IPQ é atribuída à Unidade de Metrologia Científica e Aplicada – Laboratório Central de Metrologia (UMCA-LCM) que é responsável pelo desenvolvimento do Subsistema Nacional de Metrologia no respeitante aos padrões metrológicos nacionais [8].

As funções desempenhadas pela UMCA-LCM são de variada natureza, designadamente, normativa, executiva, de coordenação, de investigação, de desenvolvimento e de cooperação externa, dos quais tem a responsabilidade e são atribuídas as seguintes competências:

- Realizar e manter os padrões nacionais das unidades de medida da responsabilidade directa do IPQ;
- Assegurar a rastreabilidade dos padrões nacionais ao SI de unidades;
- Desenvolver e participar em projectos europeus e internacionais de investigação e desenvolvimento metrológico, de padrões e métodos primários;
- Organizar e participar em comparações europeias e internacionais de padrões e instrumentos de medição;
- Gerir o Laboratório Central de Metrologia (UMCA-LCM);

- Calibrar padrões de referência e instrumentos de medição dos laboratórios acreditados e de outras entidades;
- Produzir e certificar materiais de referência;
- Promover e participar nos programas de comparações nacionais de padrões e instrumentos de medição;
- Realizar ensaios de controlo metrológico de instrumentos de medição;
- Assegurar a representação nas organizações internacionais, nomeadamente na *European Association of National Metrology Institutes* (EURAMET) e no *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) [8];

Na prossecução das suas atribuições e responsabilidades enquanto laboratório nacional de metrologia sob a superintendência do Departamento de Metrologia do IPQ, a UMCA-LCM tem uma importante contribuição para as políticas de inovação e investigação no suporte da economia e sociedade geral, nomeadamente nas áreas da Segurança, Saúde e ambiente. Está organizada pelo seguinte organograma funcional (Figura 2.5).

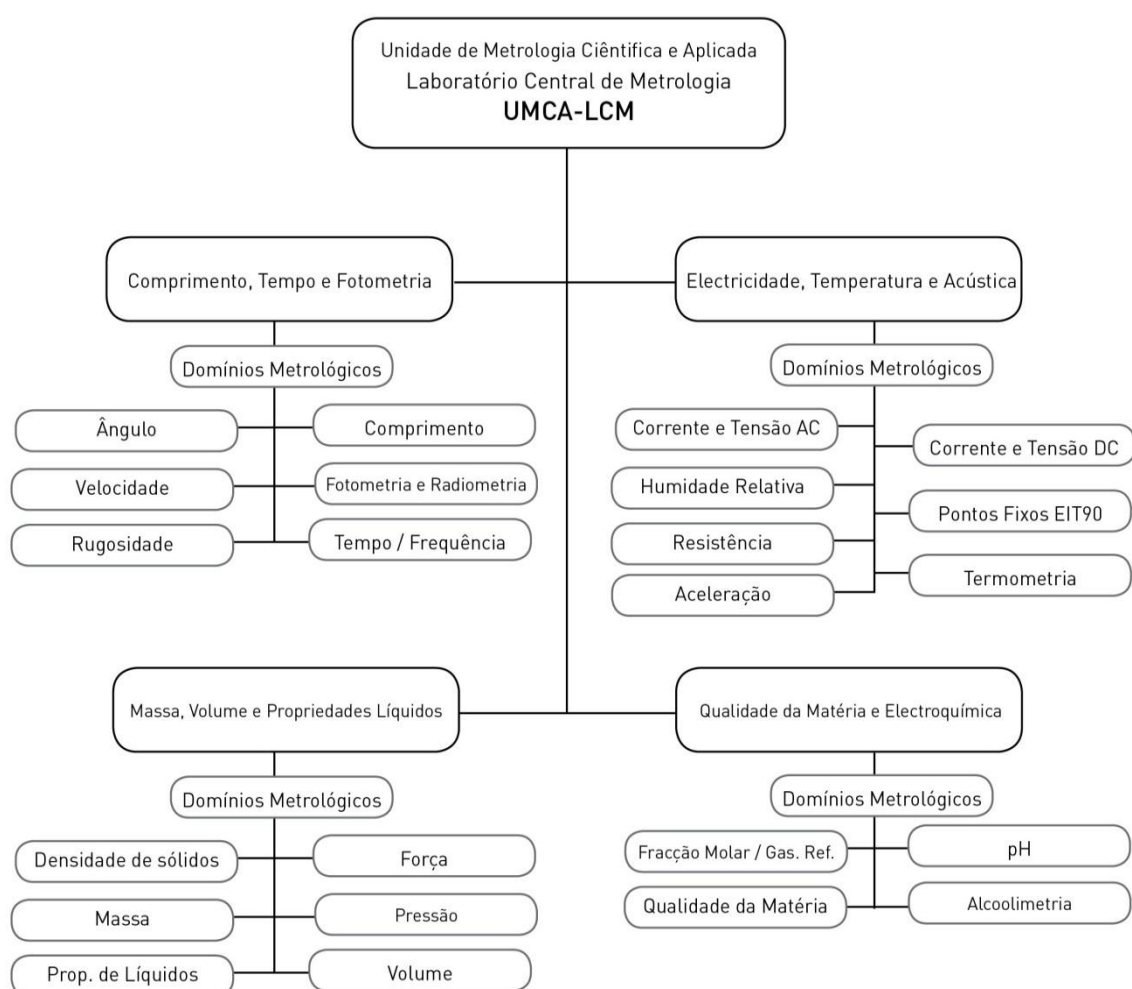


Figura 2.5: Estrutura organizacional da UMCA-LCM

2.5.1.1 Sistema de Gestão da Qualidade

No processo de acreditação e reconhecimento de competências dos laboratórios de ensaios e calibração, devem evidenciar a implementação de um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) conforme com a norma ISO 9001, não demonstrando por si só a competência do laboratório para produzir dados e resultados tecnicamente válidos [9].

A UMCA-LCM tem implementado e documentado um SGQ de acordo com a NP EN ISO/IEC 17025:2005, estando em conformidade com esta, funciona igualmente de acordo com a norma ISO 9001.

O SGQ é descrito através do Manual da Qualidade contendo a informação necessária ao funcionamento e desempenho das atribuições dos colaboradores e sua divulgação interna.

Assim sendo, o SGQ desenvolve as suas actividades assegurando a execução dos seus ensaios, a produção e certificação de materiais de referência e calibrações de acordo com os métodos estabelecidos em procedimentos técnicos e com os requisitos dos clientes tendo em vista a qualidade. É também assegurado a divulgação de reuniões e outros meios de formação aos seus colaboradores, relacionados com as actividades de ensaio, calibração e produção de materiais referência certificados (MRC), permitindo assim dar qualificações e experiência adequada ao desempenho de funções [8].

O SGQ é estruturado a partir do Manual da Qualidade que é suportado pelos procedimentos operativos, instruções de trabalho, procedimentos técnicos, impressos e registos gerais e específicos dos laboratórios segundo a seguinte hierarquia (Figura 2.6).

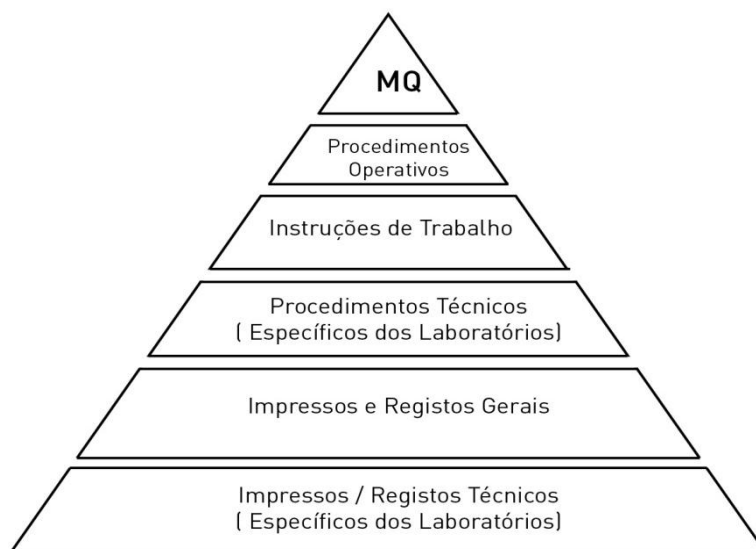


Figura 2.6: Exemplo da hierarquia do Sistema de Gestão da Qualidade

Capítulo 3: Metodologia para a Calibração de Distanciómetros

3.1 Introdução

Nos processos de calibração e de controlo metrológico são utilizados diversos equipamentos e processos experimentais definidos a partir de procedimentos técnicos.

Com a finalidade de obter competências na calibração de distanciómetros, este capítulo visa apresentar os instrumentos de medição usados no processo experimental, com especial atenção para a teoria que suporta as características técnicas, princípios de aplicação, considerações gerais do distanciómetro, do sistema laser interferométrico e dos bancos de ensaio.

Posteriormente é feita uma descrição do procedimento experimental usado para a calibração de distanciómetros e explicação detalhada sobre medição, erro de medição e mensuranda.

3.2 Equipamentos

Na elaboração deste trabalho utilizaram-se diversos instrumentos de medição, nomeadamente os utilizados na verificação do controlo metrológico de medidas materializadas de comprimento.

Estes equipamentos são usados em controlos metrológicos e processos de calibração, e permitem efectuar a actividade laboratorial nas condições ambientais de referência, onde são seguidas as especificações técnicas, e conhecida a incerteza de medição expandida.

Os equipamentos e acessórios utilizados na realização do processo experimental foram os seguintes:

- Distanciómetro *Leica DistoTM D2*;
- Sistema laser interferométrico *Hewlett-Packard (HP) 5528A*;
- Sistema laser interferométrico *Spindler & Hoyer (SH) ZLI 150*;
- Banco de ensaio *SIP (Société Genevoise d'Instruments de Physique)* de 3 m;
- Banco de ensaio de 50 m;
- Sistema de aquisição de temperaturas *ASL F250*;

- Barómetro *Druck DPI 141*;
- Tripés reguláveis;
- Mesa universal;
- Acessórios de fixação e posição
- Computador com *software LabVIEW* e placa de aquisição de dados *GPIB*;

3.2.1 Distanciómetro

O distanciómetro é um dispositivo digital, portátil, que através de um feixe laser mede distâncias (Figura 3.1).

Para além da medição de distâncias lineares, o distanciómetro tem outras capacidades como o cálculo de áreas, volumes, perímetros, medição de ângulos e medição indirecta através do teorema de Pitágoras.

Este tipo de equipamento é cada vez mais utilizado e útil devido à sua aptidão para a medição de longas distâncias, necessitando de apenas uma pessoa para executar a operação, com capacidade de medir distâncias em locais de difícil acesso, ou pontos de grande altitude, evitando assim situações perigosas.

É devido às suas características, eficiência e segurança que os distanciómetros cada vez mais, encontram a sua aplicação em sectores como a construção civil, estruturas metálicas, manutenção industrial, e em sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC).

Outras características a referir sobre os distanciómetros é a conjugação de tecnologias como *Bluetooth*, *software* de transferência de dados e mira digital.



Figura 3.1: Instrumento de medição: exemplos de distanciómetros

a) *Fluke 416D* b) *Bosch DLR130K* c) *Leica Disto™ D8* d) *PREXISO X2*

O instrumento adquirido pelo Laboratório de comprimento (LCO) a ser utilizado no desenvolvimento do procedimento de calibração de distanciómetros foi o *Leica Disto™ D2* com um feixe *laser* da classe 2 (Figura 3.2).

Os *lasers* são classificados em diferentes categorias de acordo com a norma IEC 60825-1, baseando-se no comprimento de onda e intensidade emitida, na tentativa de regulamentar a segurança devido ao potencial de provocar danos nos olhos e pele.

O *laser* de classe 2 é um *laser* visível, de baixa energia radiante, que não ultrapassa 1 mW, não provocando danos nos olhos nem na pele em circunstâncias normais, mas como precaução não se deve olhar directamente para o feixe *laser*, já que o ser humano reage com aversão à luz brilhante produzindo danos se visualizarmos directamente durante tempo prolongado [10].

As restantes características técnicas do distanciómetro *Leica Disto™ D2* são descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características técnicas do distanciómetro *Leica Disto™ D2*

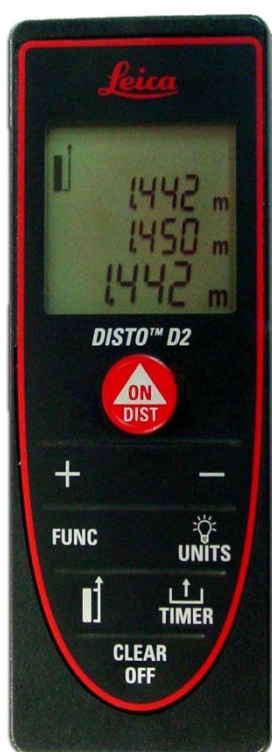


Figura 3.2: Distanciómetro *Leica Disto™ D2*

Gama de medição	0,05 a 60 m
Exactidão da medição	$\pm 1,5$ mm
Menor unidade do visor	1 mm
Classe de laser	2
Tipo de laser	635 nm, < 1 mW
Classe de protecção	IP 54, estanque às poeiras, estanque aos salpicos
Desligação automática:	
Laser	Após 60 s
Instrumento	Após 120 s
Iluminação	√
Adaptador de abrir	√
Durabilidade da bateria	Até 5000 medições
Dimensões	111 × 43 × 23 mm
Peso	90 g
Gama de Temperaturas:	
Armazenamento	−25 °C até + 70 °C
Operação	0 °C até + 40 °C

3.2.1.1 Princípio de Funcionamento do Distanciómetro

O distanciómetro é um instrumento de medição de distâncias que utiliza a medição do tempo de percurso do feixe laser entre o distanciómetro e o alvo e o percurso reflectido de volta. Esta característica é conhecida como princípio de “*Time of Flight*”.

O princípio de “*Time of Flight*” é preferencialmente utilizado na determinação de grandes distâncias, através de técnicas avançadas envolvendo equipamentos de alta tecnologia, como por exemplo telescópios sensíveis à fotodetecção, permitindo medir a distância entre a terra e a lua com uma exactidão de poucos centímetros. No caso de medições de pequenas distâncias como é o exemplo do distanciómetro, este princípio é baseado no facto do feixe laser viajar a uma velocidade constante através da atmosfera da terra, permitindo que o *software* calcule rapidamente a distância ao alvo [11].

O cálculo da distância efectuado por parte do *software* do distanciómetro é dado pela equação 3.1, com c igual à velocidade de propagação do feixe laser e t o tempo de percurso entre o equipamento e o alvo e o seu retorno ao equipamento [12].

$$D = \frac{c \cdot t}{2} \quad (3.1)$$

O feixe laser que constitui o distanciómetro viaja a uma velocidade constante, contendo menor dispersão do que a luz branca, o que permite viajar um maior intervalo de tempo sem perder a intensidade. O feixe laser quando reflectido tem também menor dispersão do que relativamente à luz branca, factor fundamental para a utilização deste tipo de feixe em instrumentos de medição [11].

Existem alguns aspectos a ter em consideração aquando da utilização de instrumentos de medição, como os distanciómetros, já que as suas medições podem ser afectadas por diversos factores.

A exactidão das medições pode ser afectada quando o alvo de incidência do feixe laser contenha qualidades reflexivas ou de espalhamento ou a sua superfície conter inconsistências, provocando a difusão do feixe laser [11].

As condições ambientais podem também ser um factor a ter em consideração na precisão das medições. É fundamental que as medições sejam efectuadas em locais onde as condições ambientais estejam dentro de condições nas gamas de temperatura referenciadas pelo fabricante. Outras condições ambientais como neve e chuva podem bloquear o feixe laser devido à refacção e dispersão deste, além de que o excesso de luz de fundo provocado pela neve interferir na medição do instrumento de medição.

3.2.2 Sistema Laser Interferométricos

O sistema laser interferométrico é um instrumento de medição, frequentemente utilizado na calibração metrológica, usado como padrão de referência.

Este instrumento de medição, para além de ser utilizado como padrão de referência na medição de distâncias lineares, é também usado na medição de desvios angulares, rectilismo, nivelamento/planeza, perpendicularidade e paralelismo [13].

No trabalho apresentado nesta dissertação o sistema laser interferométrico é utilizado como padrão de referência na medição de distâncias lineares, sendo para isso constituído por um conjunto específico de componentes. Na medição de distâncias lineares, o sistema laser interferométrico é composto por dois cubos retroreflectores, um divisor de feixe e uma unidade laser (Figura 3.3).

O esquema de montagem deste sistema foi realizado, de forma, a que o divisor de feixe se encontre entre a unidade laser e o cubo retroreflector móvel (Figura 3.3). Os cubos retroreflectores são dois: um cubo retroreflector fixo e um móvel. O cubo retroreflector fixo é colocado em contacto com o divisor de feixe, enquanto o cubo retroreflector móvel se desloca ao longo da distância a medir.

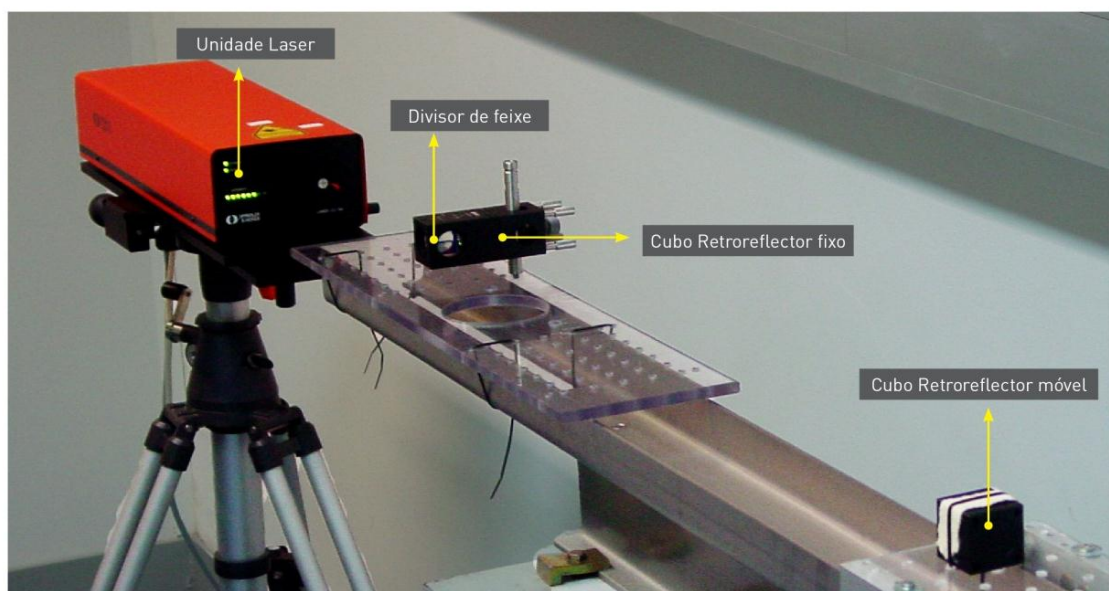


Figura 3.3: Esquema do sistema laser interferométrico concebido durante a elaboração da tese

3.2.2.1 Princípio Teórico do Laser Interferométrico

O sistema laser interferométrico (Figura 3.4) com um laser de Hélio-Néon, emite um feixe, o qual através do efeito *Zeeman* aplica-se um campo magnético axial que divide o feixe laser em dois feixes f_1 e f_2 cuja diferença é da ordem dos 2 MHz, e ambos tem polarização circular com direcções opostas [14]. Com a intenção de transformar as polarizações circulares de frequência f_1 e f_2 em polarizações lineares ortogonais entre si, uma no plano horizontal e outra no plano vertical, coloca-se no percurso dos feixes uma lamina de atraso de $\lambda/4$. Antes do feixe laser ser emitido pela unidade de controlo, uma parte deste é desviado por um divisor de feixe e detectado por um fotodetector A, com sinal de amplitude de modulação de frequência $f_1 - f_2$, é transmitida ao contador. Os dois feixes f_1 e f_2 são separados por um divisor de feixe polarizador, são transformados em feixes com polarização circular, em virtude de passarem por lamina de atraso de $\lambda/4$ até a serem reflectidos nos cubos retroreflectores e voltarem a passar nas lamina de atraso de $\lambda/4$, e serem convertidos novamente em feixes de polarização linear e ortogonal [14]. O sinal é detectado pelo fotodetector B, após a recombinação dos feixes no divisor de feixe polarizador, que a 45° coloca as componentes dos feixes sobre esse plano, e onde é enviado para outro contador, com amplitude de modulação de frequência $f_1 - f_2 - \Delta f$. A variação de frequência Δf é devida ao efeito *Doppler* e é gerada pelo deslocamento do cubo retroreflector móvel. A frequência é obtida através da comparação dos dois sinais com a mesma polarização, sendo dado pela equação 3.2 [14].

$$\Delta f = -2f_2 n \frac{v}{c} = -2 \frac{v}{\lambda_2} \quad (3.2)$$

Onde λ_2 é o comprimento de onda à frequência f_2 e v é a velocidade de propagação do feixe.

O valor do deslocamento L do cubo retroreflector móvel é determinado por integração em função do tempo (equação 3.3) [14].

$$L = \int_{t_2}^{t_1} v \, dt = -\frac{\lambda_2}{2} \int_{t_2}^{t_1} \Delta f \, dt \quad (3.3)$$

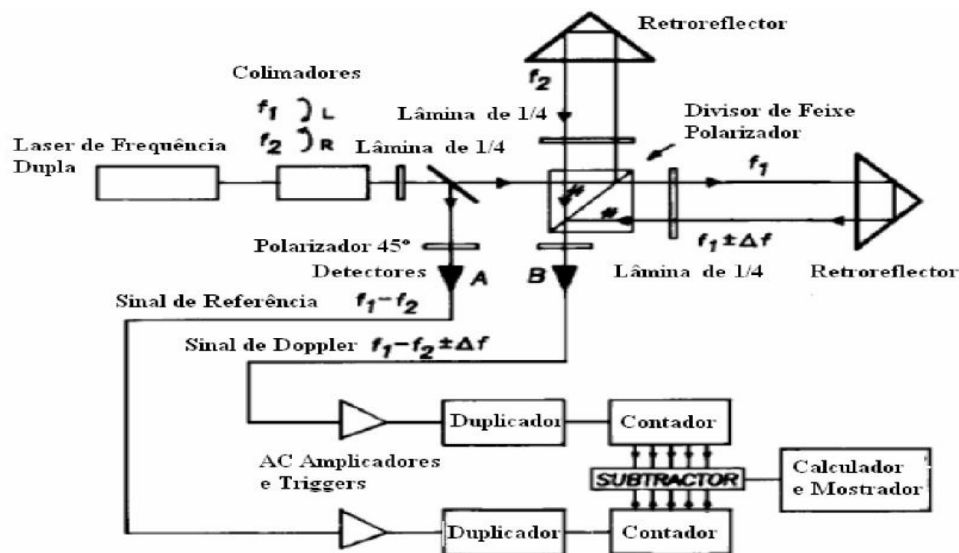


Figura 3.4: Princípio teórico do sistema laser interferométrico [14]

3.2.2.2 Interferómetro de *Michelson*

O princípio do sistema laser interferométrico a utilizar na calibração de distanciómetros tem origem no interferómetro de *Michelson* que é um instrumento óptico de elevada precisão e versatilidade.

Nos finais do século XIX a teoria electromagnética de *Maxwell* permitiu estabelecer que a luz é uma onda electromagnética, conseguindo inclusivamente reproduzir através de equações matemáticas o resultado do valor da velocidade da luz igual ao resultado determinado experimentalmente [15].

A teoria ondulatória da luz foi estabelecida na aceitação de que as ondas se propagavam num meio de suporte onde tudo penetrava, manifestando um conjunto de propriedades, já que teria de ser tão ténue que não perturbasse o movimento dos corpos celestes, existindo ainda forças de restabelecimento notavelmente fortes. A velocidade da luz constante obtida a partir das equações de *Maxwell* seria a velocidade de propagação da luz nesse espaço absoluto, conhecido como éter, do qual os físicos do século XIX acreditavam que existia. O éter era então considerado o meio de propagação das ondas electromagnéticas, tal como ocorre noutros movimentos ondulatórios, como por exemplo, o som que se propaga no ar e as ondas de água que se propagam na água. O éter deveria portanto, preencher todo o espaço constituindo um referencial em repouso à medida que a terra o atravessa [15] [16].

O interferómetro de *Michelson* separa um feixe laser em dois feixes perpendiculares, através de um divisor de feixe G1 (espelho semitransparente) colocado a 45° do feixe incidente (Figura 3.5). Um feixe B1 é reflectido e toma o percurso óptico até ao espelho M1, que volta a reflectir o feixe de volta para o divisor de feixe G1, e é refractado para o alvo. O outro feixe, B2, é transmitido para o espelho M2 num percurso perpendicular ao feixe B1, e que volta em percurso contrário após o feixe ser reflectido pelo espelho M2 até ao divisor de feixe G1 sendo posteriormente refractado em direcção ao alvo sobrepondo-se ao feixe B1 [17].

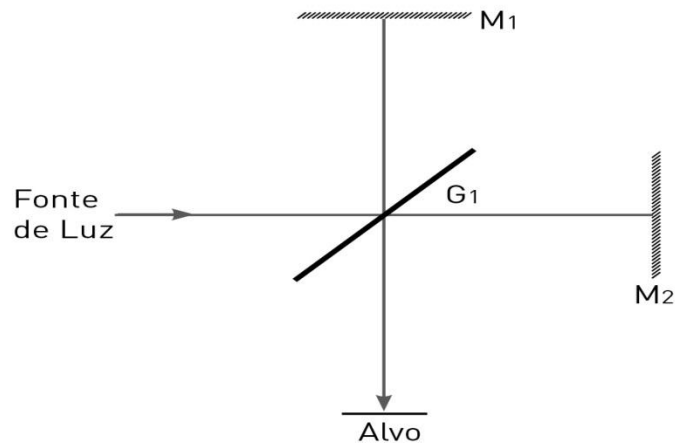


Figura 3. 5: Esquema do interferómetro de *Michelson*

3.2.3 Banco de Ensaio

O banco de ensaio é um equipamento que serve de suporte a processos de calibração lineares constituído principalmente por um carro acoplado que se movimenta linearmente ao longo do eixo. Este equipamento é constituído por um sistema de suporte e um sistema de movimentação.

Na realização das medições de distância, correspondente à, parte experimental deste trabalho, foram utilizados dois bancos de ensaio, um Banco de ensaio *SIP* (*Société Genevoise d'Instruments de Physique*) de 3 m e um Banco de ensaio de 50 m.

3.2.3.1 Banco de Ensaio SIP de 3 m

O banco de ensaios *SIP* de 3 m foi fornecido pela *Société Genevoise d'Instruments de Physique*, e é constituído por um sistema de suporte e por um sistema de movimentação (Figura 3.6).

O banco é constituído no topo por sulcos em “V” de guiamento em translação e uma cremalheira linear. Na base, o sistema de suporte está apoiado ao chão através de três pés reguláveis. Estes três apoios permitem constituir três pontos definindo assim um plano, o que é fundamental para que o equipamento esteja num plano horizontal.

O sistema de movimentação é constituído por um carro que é accionado através de manivela, com dois avanços, um de passo grosso e outro de passo fino.

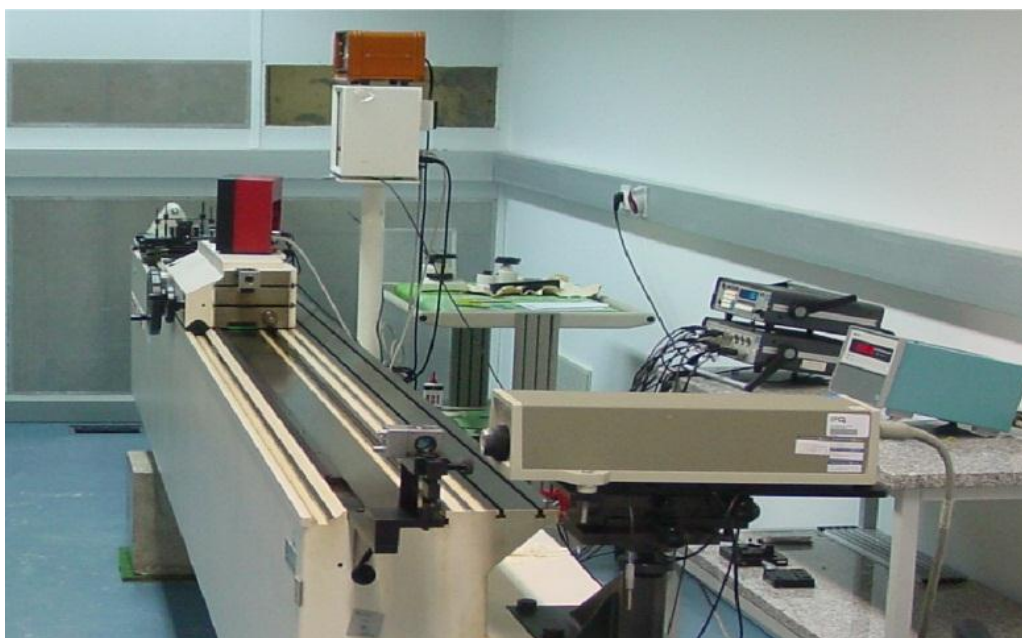


Figura 3.6: Banco de ensaio SIP de 3 m

3.2.3.2 Banco de Ensaio de 50 m

O banco de ensaio de 50 m encontra-se numa fase preliminar de desenvolvimento, sendo o resultado de um antigo projecto de cooperação com Instituto Superior Técnico. O banco de ensaios existente corresponde apenas à sua estrutura de suporte, composta por várias colunas, diversos perfis em I e diversas calhas ao longo de 50 m (Figura 3.7). Estas colunas têm a particularidade de estarem assentes no chão através de três pés reguláveis, de forma a permitir definir um plano totalmente horizontal.

O sistema de movimentação é designado por “carro”, que se desloca linearmente ao longo do eixo do banco, sendo accionado manualmente.

É importante referir que a estrutura existente foi construída tendo como base um projecto cuja viabilidade final não chegou a ser concluída, servindo no entanto como ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho, obtenção de conclusões e sugestões de melhoria.



Figura 3.7: Banco de ensaio de 50 m

3.2.4 Outros Equipamentos Utilizados

Na execução de todo o processo experimental descrito na presente tese foram utilizados outros instrumentos de medição, assim como acessórios de fixação e posição para a realização das montagens dos componentes ópticos, das unidades laser do sistema laser interferométrico e do distanciómetro.

Foi usado na aquisição de dados relativos às condições ambientais existentes no laboratório um sistema de aquisição de temperaturas *ASL F250* e um barómetro *DRUCK DPI 141*, com o objectivo de registar durante a realização dos ensaios as condições de temperatura e pressão existentes.

Na recolha de dados fornecidos pelo sistema laser interferométrico foi utilizado um computador com o *software LabVIEW* incorporado e uma placa de aquisição de dados *GPIB*.

3.3 Procedimento Experimental

A realização da parte experimental deste trabalho consistiu em desenvolver um método que permitisse estabelecer um procedimento técnico na calibração de distanciómetros, com a finalidade de ser utilizado no laboratório de comprimento (LCO) da UMCA-LCM do IPQ, detalhado com as especificações definidas no SGQ e na norma dos Requisitos gerais de competências para laboratórios de ensaio e calibração NP EN ISO/IEC 17025:2005.

O processo experimental iniciou-se com um estudo prévio de todos os equipamentos utilizados no laboratório, com incidência no distanciómetro e no padrão de referência, sistema laser interferométrico. Este estudo permitiu desenvolver competências na utilização dos respectivos equipamentos, esclarecendo objectivos para a realização de ensaios com vista à calibração de distanciómetros.

Uma das características em comum entre o distanciómetro e o padrão de referência é que são ambos influenciados pelas condições ambientais no laboratório, nomeadamente pela temperatura e pressão. Os instrumentos de medição em questão utilizam feixes de luz, pelo que são igualmente influenciados pelas condições ambientais. Por este motivo no balanço da incerteza dos valores dos erros de indicação não existem as grandezas de entrada correspondentes às condições ambientais. As condições de referência ambientais são $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, em conformidade com a ISO 1. Os ensaios foram realizados em condições ambientais de $t = (20 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os ensaios realizados no banco de ensaios *SIP* de 3 m foram efectuados com o objectivo de obter conhecimentos sobre a funcionalidade do instrumento de medição a calibrar e do padrão de referência, procurando extrapolar algum do conhecimento obtido para o banco de ensaios de 50 m.

Previamente à recolha dos primeiros dados de ensaio colocou-se o distanciómetro, o padrão de referência e o sistema laser interferométrico *Hewlett-Packard (HP)*, no banco de ensaio *SIP* de 3 m. Dispostos os equipamentos de medição no banco de ensaio *SIP* de 3 m efectuou-se o alinhamento dos mesmos.

Em relação ao sistema laser interferométrico o alinhamento foi efectuado através do esquema de alinhamento aconselhado pelo manual do sistema laser interferométrico HP, apresentado na figura 3.8.

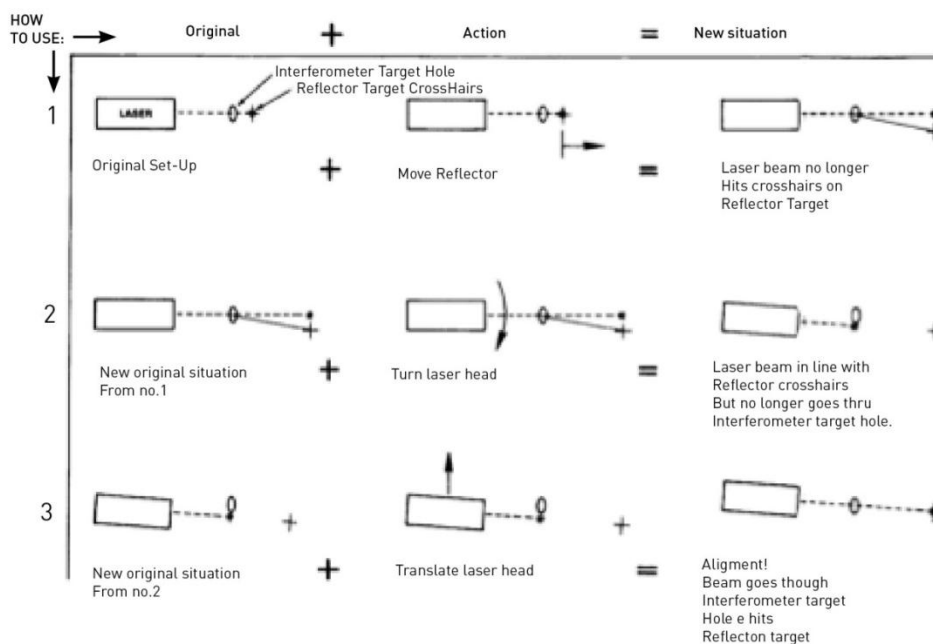


Figura 3.8: Esquema de alinhamento do sistema laser interferométrico

Estabelecido o alinhamento do sistema laser interferométrico *HP*, procurou-se avaliar a forma de alinhamento do distanciômetro.

Aproveitando as competências desenvolvidas no alinhamento do sistema laser interferométrico *HP*, idealizou-se um processo de alinhamento para o distanciômetro. Este alinhamento começou com a utilização prática de uma mesa universal (Figura 3.9), equipamento com cinco graus de liberdade, que permite realizar movimentos de translação segundo os eixos OX , OY e OZ e movimentos relativos de rotação segundo os eixos OY e OZ .

Os movimentos relativos da mesa universal são identificados a partir da figura 3.9.

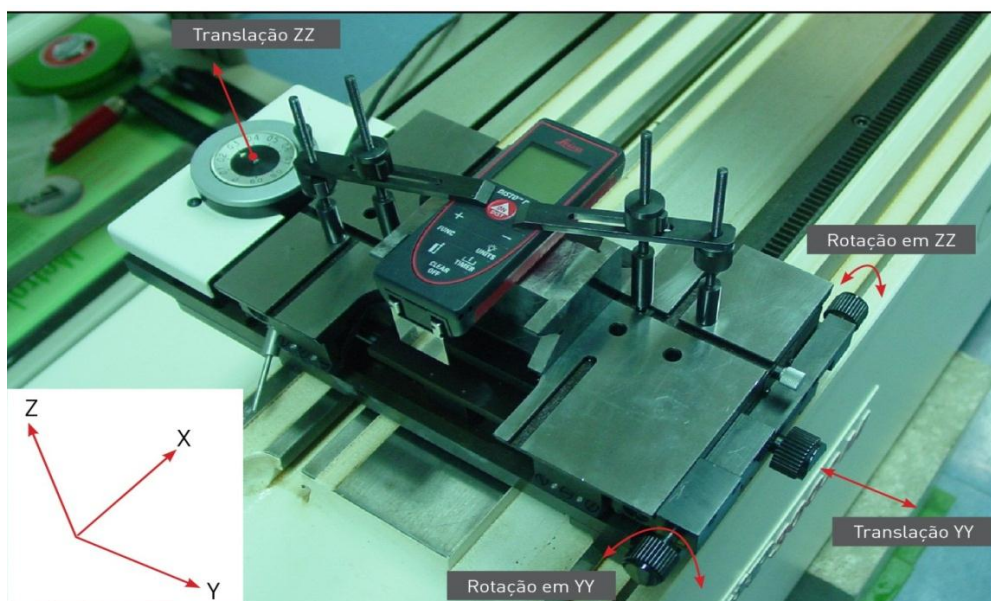


Figura 3.9: Esquema dos movimentos relativos da mesa universal

Uma vez identificados os movimentos da mesa universal realizou-se o alinhamento do distanciómetro com base nos conhecimentos adquiridos no alinhamento do padrão de referência.

Após a fixação do distanciómetro à mesa universal o alinhamento é efectuado através da deslocação do sistema de movimentação do banco de ensaio (carro), analisando-se a trajectória do ponto de incidência do feixe laser na placa alvo solidária com o carro. Coloca-se o sistema de movimentação do banco de ensaio no ponto inicial e actua-se nos parafusos da mesa universal para executar o movimento do distanciómetro em sentido contrário ao desalinhamento verificado na placa alvo através do movimento de rotação, para além do centro da placa alvo em seguida efectua-se a compensação do movimento de rotação através da acção nos parafusos do movimento de translação da mesa universal em sentido contrário. Por último, faz-se percorrer novamente o sistema de movimentação do banco de ensaio toda a gama de medição do banco para verificar o alinhamento.

A figura 3.10 descreve esquematicamente o processo de alinhamento do distanciómetro.

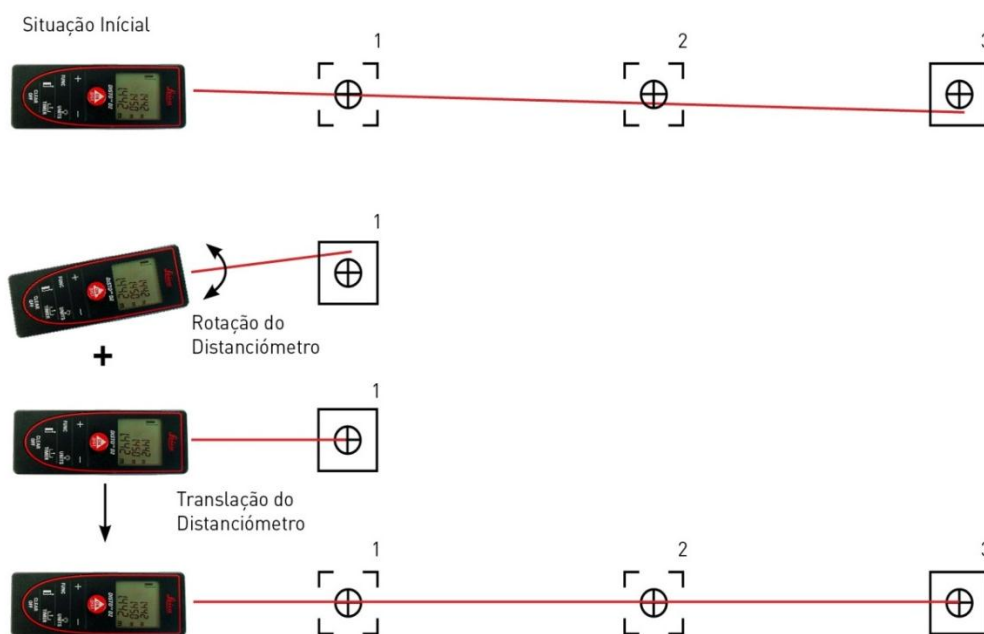


Figura 3.10: Esquema do alinhamento do distanciómetro

Realizados os alinhamentos dos instrumentos de medição, efectuaram-se os ensaios no banco de ensaio *SIP* de 3 m. A primeira avaliação consistiu na determinação de algumas das características metrológicas do distanciómetro, nomeadamente o valor mínimo do intervalo nominal de indicação e estabilidade do distanciómetro.

Após identificadas as características metrológicas do distanciómetro realizaram-se no banco de ensaios *SIP* de 3 m ensaios com o objectivo de avaliar as condições de repetibilidade e reprodutibilidade no balanço da incerteza de medição (avaliação tipo A).

A repetibilidade é a fidelidade de medição num conjunto de condições, que inclui o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições operativas e a mesma localização, e medições repetidas no mesmo objecto ou objectos similares, num curto intervalo de tempo [1].

A reprodutibilidade é a fidelidade de medição num conjunto de condições, que inclui os diferentes locais, operadores e sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objecto ou objectos similares [1].

Com a intenção de procurar realizar os ensaios em condições de medição semelhantes às que um distanciómetro opera e visto que este é um instrumento de medição de longo alcance, realizaram-se ensaios de repetibilidade e reprodutibilidade para o banco de ensaio de 50 m.

Os ensaios com o banco de 50 m permitiram ainda estabelecer outros conhecimentos do distanciómetro (alinhamento do distanciómetro), que ainda não tinham sido detectados nos ensaios no banco de ensaios *SIP* de 3 m.

Do mesmo modo que se realizaram as montagens e alinhamento dos instrumentos de medição no banco de ensaio *SIP* de 3 m, efectuou-se também o mesmo procedimento para o banco de ensaio de 50 m. Outro aspecto importante a efectuar é o alinhamento horizontal do próprio banco de ensaios, através da regulação das colunas de betão (Figura 3.11).

O alinhamento do banco é efectuado em conjunto com o alinhamento do sistema laser interferométrico, neste caso, um equipamento da *Spindler & Hoyle* (*SH*). Este alinhamento é realizado em primeiro lugar, através do alinhamento do sistema laser interferométrico do *SH* em dois pontos distantes entre eles, usando a técnica descrita na figura 3.8. Alinhado o sistema laser interferométrico, o banco terá uma configuração semelhante ao esquema apresentado na figura 3.11, relativamente à recta entre os dois pontos de alinhamento.

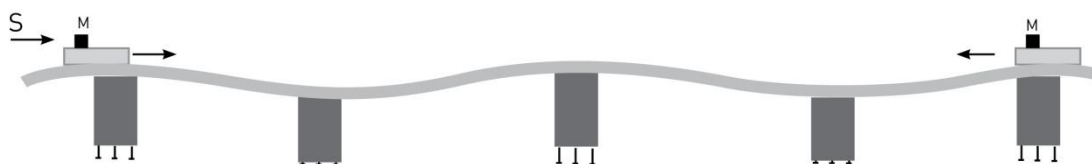


Figura 3.11: Esquema do banco de ensaio de 50 m do desalinhamento

Tendo o sistema laser interferométrico alinhado nos dois pontos M, extremos do banco de ensaios, quando o sistema laser tem sinal de recepção no máximo, procede-se ao alinhamento total do banco, fazendo percorrer o sistema de movimentação do banco, ao qual se encontra solidário o cubo retroreflector móvel e o alvo. Se este se encontrar desalinhado, o sinal de recepção baixa, ou perde-se mesmo, deixando de ter capacidade de medir distâncias.

O alinhamento/rectilismo do banco é efectuado através da regulação em altura das colunas de betão, até o sistema laser ter sinal no máximo ao longo de todo o sistema de movimentação (Figura 3.12).



Figura 3.12: Esquema do banco de ensaio de 50 m alinhado

Realizados os alinhamentos dos instrumentos de medição, nomeadamente do distanciómetro, do sistema laser interferométrico e do banco de ensaio de 50 m, efectuaram-se ensaios para obtenção de valores do erro de indicação. Com base nestes valores foram avaliadas as condições de repetibilidade e reprodutibilidade e, conseqüentemente, a análise de outras grandezas de entrada a considerar na incerteza de medição.

Concluídos os ensaios anteriormente referidos, procedeu-se à elaboração do procedimento técnico e concretizou-se a elaboração do Certificado de Calibração/Relatório de Ensaio, com o princípio de medição a consistir na determinação do erro de medição, por comparação entre o valor de indicação do distanciómetro e o valor de indicação do sistema laser interferómetro para o respectivo valor nominal, e determinou-se a incerteza de medição expandida.

3.4 Medição

A medição é o processo experimental para obter um ou mais valores razoavelmente atribuídos a uma grandeza [1].

A medição não se aplica a propriedades nominais. A medição implica a comparação de grandezas, incluindo a contagem de entidades. A medição pressupõe uma descrição da grandeza compatível com o uso pretendido de um resultado da medição, um procedimento de medição e

um sistema de medição calibrado, a funcionar de acordo com o procedimento de medição especificado, incluindo as condições de medição [1].

O resultado da medição é apenas uma aproximação ou uma estimativa do valor da mensuranda, que é determinado em muitos casos com base numa série de observações obtidas sob condição de repetibilidade. Este conjunto de observações é de extrema importância, pelo facto do tratamento matemático deste conjunto influenciar o resultado de medição, estando muitas vezes incluídas grandezas desconhecidas que contribuem para a incerteza de medição [18].

O resultado da medição só está completo depois do valor da mensuranda estar associado a uma incerteza de medição [18].

3.5 Erro de Medição

O erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência [1].

$$e = x_i - x_{ref} \quad (3.4)$$

Onde x_i é o valor medido de uma grandeza e x_{ref} é o valor de referência.

O erro de medição é utilizado quando há um valor de referência único, o que ocorre se uma calibração é efectuada por meio de um padrão de medição com incerteza de medição desprezável, ou se é dado um valor convencional, caso em que o erro é conhecido. O conceito de erro pode ser utilizado se a mensuranda é supostamente representada por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezável, caso em que o erro é desconhecido [1].

Existem vários tipos de componentes do erro de medição:

O *erro sistemático* é a componente do erro de medição que em medições repetidas permanece constante ou varia de uma forma previsível. O valor de referência para o erro sistemático é um valor verdadeiro, ou um valor medido de um padrão de incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. O erro sistemático e as suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. Deve aplicar-se uma correcção para compensar um erro sistemático conhecido. O erro sistemático é igual ao erro de medição menos o erro aleatório [1].

O *erro aleatório* é a componente do erro de medição que em medições repetidas varia de forma imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser sumariada pela

esperança matemática, geralmente assumida como nula, e pela sua variância. O erro aleatório é igual ao erro de medição menos erro sistemático [1].

3.6 Mensuranda

Na calibração de equipamentos de medida a mensuranda é obtida através de uma única grandeza de saída Y , que não é adquirida directamente, mas sim a partir da determinação de várias de grandezas de entrada X_i ($i=1, 2, \dots, N$), de acordo com a relação funcional [18] [19].

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.5)$$

A mensuranda é a grandeza que se pretende medir [1]. É a grandeza de saída Y que depende da função modelo f das grandezas de entrada X_i , conduzindo a uma expressão analítica, ou mais do que isso, levando a várias expressões influenciadas por diversas grandezas. Devido à complexidade que a função f pode vir a tomar, esta pode ser determinada experimentalmente ou numericamente através da avaliação de um algoritmo informático, ou mesmo por intermédio da combinação de ambas as formas [18].

Capítulo 4: Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição

4.1 Introdução

Na realização da calibração de instrumentos de medição é adoptado um documento “*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*” que estabelece os princípios e requisitos gerais para a avaliação da incerteza de medição [18]. Como exemplo é também expresso o modo de apresentação do resultado de medição nos certificados de calibração.

Este capítulo apresenta os passos para a avaliação da expressão da incerteza de medição, bem como o procedimento de cálculo da incerteza de medição na calibração de distanciómetros.

4.2 Incerteza de medição

A incerteza de medição é o parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores da grandeza que são atribuídos à mensuranda a partir das informações usadas [1].

A incerteza de medição inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos, tais como componentes associados a correcções e valores atribuídos a padrões, bem como a incerteza definicional. Por vezes, os efeitos sistemáticos conhecidos não são corrigidos mas incorporados como componentes da incerteza. O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão, denominado incerteza-padrão (ou um múltiplo dele), ou a metade da largura de um intervalo, para um nível de confiança determinado. A incerteza de medição compreende em geral muitas componentes. Algumas destas podem ser estimadas por uma avaliação de tipo A da incerteza de medição a partir da distribuição estatística dos valores da grandeza em séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. Outras, que podem ser estimadas por uma avaliação de tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão, avaliados através de funções de densidade de probabilidade baseados na experiência ou outras informações. Em geral, para um dado conjunto de informações, subentende-se que a incerteza de medição está associada a um determinado valor atribuído à mensuranda. Uma modificação deste valor implica uma modificação de incerteza associada [1].

A determinação do resultado da medição exige o conhecimento de uma quantidade significativa de informação, atendendo a que o resultado deste é apenas uma estimativa do valor da mensuranda com a contribuição de uma incerteza. No resultado da medição existem diversas fontes de incerteza possíveis:

- Definição incompleta da mensuranda;

- Realização imperfeita da definição da mensuranda;
- Amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar a mensuranda definida;
- Influência das condições ambientais mal conhecida ou deficientemente medida;
- Erros de leitura dos instrumentos analógicos;
- Resolução finita dos instrumentos ou limiar de mobilidade;
- Valores inexactos dos padrões e dos materiais de referência;
- Valores inexactos das constantes e outros parâmetros obtidos na bibliografia e utilizados no algoritmo matemático;
- Aproximação e hipóteses contidas no método e procedimento de medição;
- Variações nas observações repetidas da mensuranda, aparentemente, nas mesmas condições [18];

As fontes de incerteza acima referidas não são necessariamente independentes umas das outras.

A incerteza de medição define a qualidade do próprio resultado de medição estando ambos inteiramente relacionados.

4.3 Grandeza de Entrada

A grandeza de entrada, por definição, é a grandeza que deve ser medida, ou grandeza cujo valor pode ser obtido para calcular um valor medido de uma mensuranda [1].

O modo de determinação do valor da grandeza, como a incerteza associada a este valor permite agrupar as grandezas de entrada X_i em categorias:

- As grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são determinadas directamente na medição. Estes valores podem ser obtidos, por exemplo, de uma simples observação, de observações repetidas, ou de avaliação baseada na experiência. Podem envolver a determinação de correcções às indicações de instrumentos, bem como as correcções das grandezas de influência, como sejam a temperatura ambiente, a pressão atmosférica ou a humidade relativa;
- As grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são provenientes de origem externas à medição, tais como as grandezas associadas aos padrões de medição

calibrados, aos materiais de referência certificados ou aos dados de referência obtidos de manuais [18];

4.4 Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada

A avaliação da incerteza de medição é feita com base numa estimativa das grandezas de entrada que se dividem em duas categorias de avaliação, “tipo A” e “tipo B”, em que são baseadas em distribuições de probabilidades, e que a suas componentes de incerteza-padrão resultam da quantificação por variância e desvio-padrão.

4.4.1 Avaliação de Tipo A da Incerteza-padrão

O método de tipo A é a avaliação de uma componente da incerteza de medição através de análise estatística dos valores medidos obtidos em condições de medição especificadas [1].

A análise estatística é efectuada através do desvio-padrão experimental da média de uma série de observações decorrente do cálculo da média ou da análise de uma regressão matemática.

A avaliação do tipo A da incerteza-padrão pode ser aplicada nas condições de repetibilidade de uma das grandezas de entrada X_i com o número de observações ($n > 1$) independentes, adquiridas sob as mesmas condições de medição, com a obtenção da estimativa da grandeza \bar{q} utilizando a média aritmética das observações q_j ($j=1, 2, \dots, n$) (equação 4.1) [18].

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (4.1)$$

A raiz quadrada da variância experimental $s(q)$, das observações (equação 4.2) é o desvio-padrão experimental, que estima a variância correspondente da distribuição de probabilidades caracterizando a dispersão do valor da média de grandeza de entrada \bar{q} [18].

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (4.2)$$

A incerteza-padrão $u(x_i)$ da estimativa da grandeza \bar{q} de entrada é o desvio-padrão experimental da média (equação 4.3).

$$u(x_i) = s(\bar{q}) \quad (4.3)$$

4.4.2 Avaliação de Tipo B da Incerteza-padrão

O método do tipo B é a avaliação de uma componente da incerteza de medição por outros processos que não os da análise estatística de séries de observações. A incerteza-padrão $u(x_i)$ é avaliada com base numa apreciação científica utilizando todas as informações disponíveis sobre a variabilidade das grandezas de entrada X_i , das quais podemos incluir as seguintes:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- Especificações de fabricantes;
- Dados provenientes de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais [18];

A avaliação do tipo B da incerteza-padrão pode ser tão confiável como a avaliação da incerteza-padrão do tipo A, embora exista condicionalismos neste tipo de avaliação, já que se baseia na experiência e conhecimento científico, com a individualização de alguns casos.

Quando apenas um único valor é conhecido, a partir de um valor medido, um valor resultante de uma medição anterior, um valor de referência de literatura ou um valor de correcção, este valor deverá ser utilizado como a estimativa da grandeza de entrada x_i . A incerteza-padrão $u(x_i)$, quando dada deverá ser adoptada, senão deverá ser calculada a partir de dados inequívocos ou deverá ser avaliada com base na experiência [18].

A estimativa da grandeza de entrada x_i deverá ser o valor esperado da atribuição da distribuição de probabilidade para a grandeza X_i com base na teoria ou na experiência e a raiz quadrada da variância da mesma distribuição será a incerteza-padrão $u(x_i)$ [18].

Para grandezas de entrada X_i provenientes, como exemplo das especificações do fabricante para o instrumento de medição, gama de temperaturas, erro de arredondamento ou truncagem proveniente de tratamento automático, que só são possíveis estimar os valores limites superior e inferior a_+ e a_- deve ser usada uma distribuição de probabilidades rectangular (equação 4.4) para a variabilidade possível de X_i [18].

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (4.4)$$

Para os respectivos valores estimados o quadrado da incerteza-padrão.

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ - a_-)^2 \quad (4.5)$$

Se a diferença entre os valores limite for $2a$ então ter-se-á:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \quad (4.6)$$

Na ausência de qualquer outra informação que não seja a dos seus limites de variabilidade, com conhecimento insuficiente da grandeza de entrada X_i torna-se razoável admitir uma probabilidade de distribuição rectangular. Contudo quando existe conhecimento dos valores centrais da grandeza, mais prováveis que os valores limite, a probabilidade deverá ser usada com uma distribuição triangular ou normal, ou se os valores perto dos valores limite forem os mais prováveis a distribuição deverá ser em “forma-de-U” [19].

4.5 Processos estatísticos de avaliação da Incerteza-Padrão

A estimativa da grandeza de entrada x_i e a incerteza-padrão $u(x_i)$ são obtidas com base na distribuição de probabilidades dos valores da grandeza de entrada X_i . A avaliação da distribuição de probabilidade das grandezas de entrada X_i é efectuada de acordo com o tipo de avaliação que traduz, sendo a avaliação do tipo A uma distribuição baseada na frequência dos valores da série de observações, enquanto a avaliação do tipo B é uma distribuição apoiada na informação conhecida à *priori* dos valores da grandeza. As distribuições de probabilidade são modelos que representam o estado de conhecimento das grandezas de entrada X_i [18].

4.5.1 Distribuição Normal

A distribuição normal, ou gaussiana, é uma distribuição de probabilidade contínua, que descreve as variáveis aleatórias independentes e frequência relativamente à magnitude dos valores da medição, sendo a função de densidade de probabilidade dada pela equação 4.7 [18] [20] (Figura 4.1).

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.7)$$

Onde μ é a média aritmética e σ o desvio-padrão.

Este tipo de distribuição é normalmente utilizada na avaliação da incerteza de medição do tipo A, embora exista casos de utilização da distribuição normal na avaliação do tipo B quando existe informação de que os valores da grandeza de entrada X_i se encontram mais centrais em relação aos valores limite.

A incerteza-padrão $u(x_i)$ é expressa pela equação 4.8 [20].

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad (4.8)$$

Onde a é o valor da incerteza e k o factor de expansão

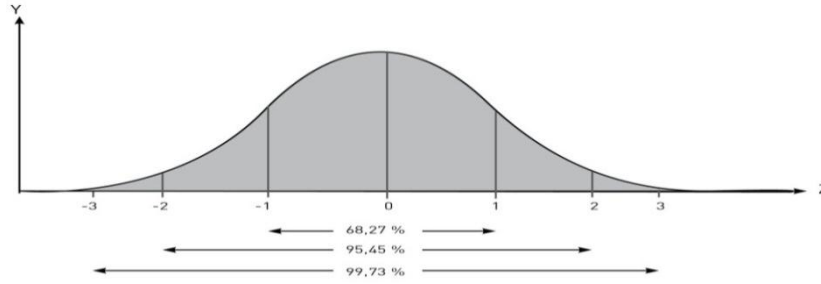


Figura 4. 1: Distribuição de probabilidade normal

4.5.2 Distribuição Rectangular

A distribuição rectangular ou uniforme é uma distribuição de probabilidade contínua de frequência constante, com capacidade de gerar valores dentro de um intervalo de medição (Figura 4.2). Esta distribuição é geralmente usada na avaliação da incerteza de medição do tipo B quando se constata a falta de informação sobre a grandeza de entrada X_i , assumindo-se que valor da grandeza se encontra num intervalo a_- até a_+ , com a função de densidade da probabilidade dada pela equação 4.9 [18] [20].

$$f(x) = \frac{1}{2a}, \quad a_- \leq x \leq a_+ \quad (4.9)$$

Em consonância com a equação 4.5, a incerteza-padrão $u(x_i)$ é expressa pela equação 4.10 no caso da distribuição rectangular.

$$u(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{12}} \quad (4.10)$$

Existindo simetria entre os valores limite do intervalo ir-se-á obter, através da diferença destes, $2a$, para uma probabilidade aproximadamente de 100%, onde a incerteza-padrão $u(x_i)$ é obtida através da equação 4.11 [20].

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4.11)$$

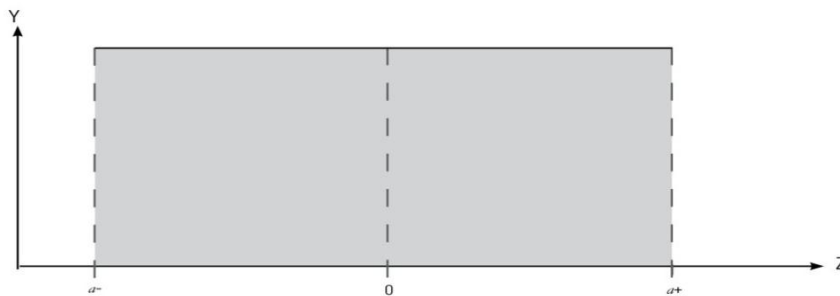


Figura 4. 2: Distribuição de probabilidade rectangular

4.5.3 Distribuição Triangular

A distribuição triangular é uma distribuição de probabilidade contínua, de frequência linearmente decrescente em relação à média dos valores da grandeza de entrada X_i (Figura 4.3). Esta distribuição ocorre usualmente numa avaliação da incerteza de medição do tipo B, assumindo o conhecimento de informações a respeito da grandeza de entrada X_i ao se encontrar dentro do intervalo de a_- até a_+ de forma simétrica. A função de densidade da probabilidade foi obtida pela equação 4.12 [18] [20].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-a_-}{a^2}, & a_- \leq x \leq \frac{a_++a_-}{2} \\ \frac{a_+-x}{a^2}, & \frac{a_++a_-}{2} \leq x \leq a_+ \\ 0, & a_- \geq x \geq a_+ \end{cases} \quad (4.12)$$

A diferença dos valores limite é $2a$ devido à sua simetria para uma probabilidade aproximadamente de 100% a incerteza-padrão $u(x_i)$ é expressa pela equação 4.13 [20].

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (4.13)$$

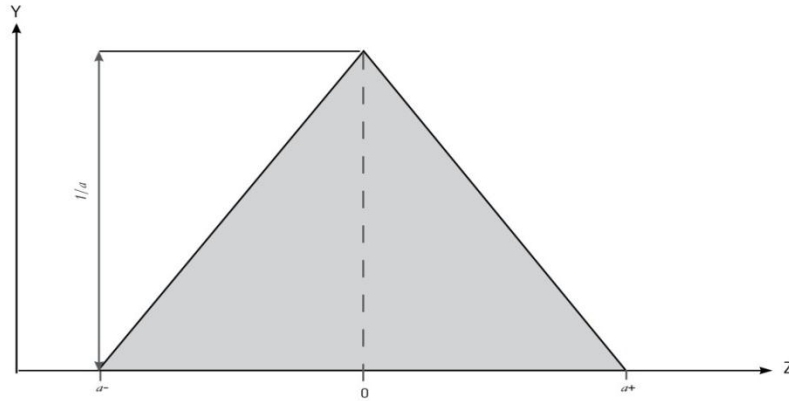


Figura 4. 3: Distribuição de probabilidade triangular

4.5.4 Distribuição “Forma-de-U”

A distribuição em “forma-de-U” é uma distribuição contínua de frequência muito baixa em relação ao valor médio das grandezas de entrada X_i , com um aumento da frequência dos valores significativo junto dos valores limite do intervalo. Esta distribuição ocorre geralmente numa avaliação da incerteza de medição do tipo B, existindo uma simetria entre os valores do intervalo de a_- até a_+ sendo a diferença entre os valores limite $2a$, para uma probabilidade aproximadamente de 100%, a incerteza-padrão $u(x_i)$ é expressa pela equação 4.14 [20].

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (4.14)$$

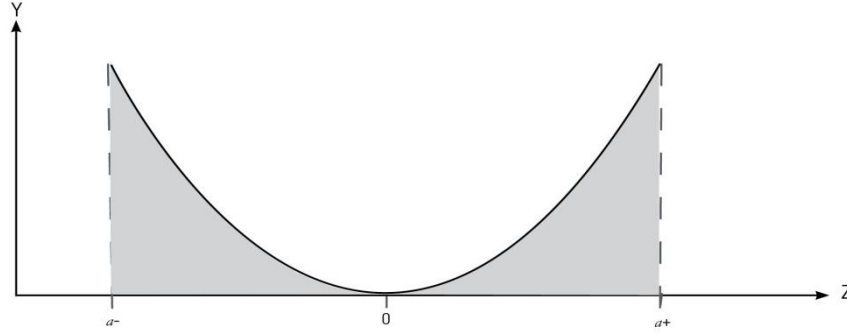


Figura 4. 4: Distribuição de probabilidade em “Forma-de-U”

4.6 Cálculo da Incerteza-Padrão da Mensuranda

A determinação da incerteza-padrão da mensuranda é calculada de acordo com o tipo de grandeza de entrada X_i , podendo as grandezas serem independentes, ou de algum modo as grandezas de entrada serem correlacionadas, já que de uma maneira ou de outra estas se encontram dependentes.

A incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y , para os casos das grandezas de entrada não correlacionadas é dada pela equação 4.15 [18].

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (4.15)$$

A grandeza $u_i(y)$, com $i = 1, 2, \dots, N$, é a contribuição para a incerteza-padrão associada à mensuranda resulta do produto da incerteza-padrão com o coeficiente de sensibilidade c_i , ambos associados à estimativa da grandeza de entrada x_i [18].

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (4.16)$$

O coeficiente de sensibilidade é a derivada parcial da função modelo f das grandezas de entrada X_i , avaliada na estimativa da grandeza de entrada x_i descrevendo como a mensuranda é influenciada pelas variações de cada uma das estimativas das grandezas de entrada x_i [18].

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \quad (4.17)$$

A avaliação do coeficiente de sensibilidade pode ser feita de acordo com a equação 4.17, ou através doutros métodos, como a utilização de métodos numéricos, calculando a variação na mensuranda y devido à variação da estimativa da grandeza de entrada x_i de $+u(x_i)$ e $-u(x_i)$, tomando como valor de c_i a diferença resultante da estimativa da grandeza de saída y dividida por $2u(x_i)$. Outro método que pode ser apropriado utilizar na avaliação do coeficiente de sensibilidade é a determinação da variação da estimativa da grandeza de saída y através de um ensaio de repetição de medição [18].

No caso das grandezas de entrada serem correlacionadas, a covariância associada às estimativas x_i e x_k deve ser considerada como uma contribuição para a incerteza, através da equação da lei da propagação.

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N u_i(y) u_k(y) r(x_i, x_k)} \quad (4.18)$$

Os coeficientes de sensibilidade c_i e c_k são definidos pela equação 4.17. A grandeza $u_i(y)$ é a contribuição para a mensuranda y resultante da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de entrada x_i dada pela equação 4.8 e $r(x_i, x_k)$ é o coeficiente de covariância dado pela equação 4.19 [18].

$$r(x_i, x_k) = \frac{u(x_i, x_k)}{u(x_i) \cdot u(x_k)}, (i \neq k) \quad (4.19)$$

A covariância associada às estimativas de duas grandezas de entrada x_i e x_k pode ser considerada nula ou insignificante quando as grandezas de entrada X_i e X_k forem independentes, ou quando estas forem consideradas constantes ou quando a informação é insuficiente para avaliar a covariância entre as grandezas [18].

4.7 Incerteza de Medição Expandida

Nos trabalhos de calibração de equipamentos de medição e devido às suas aplicações comerciais, industriais e de regulamentação da saúde e segurança existe a necessidade de conhecer uma medida da incerteza que define um intervalo sobre o valor verdadeiro da medição denominada de incerteza de medição expandida U .

A incerteza de medição expandida U é obtida multiplicando a incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída y por um factor de expansão k [18].

$$U = k \cdot u(y) \quad (4.20)$$

O factor de expansão k é a estimativa correspondente a uma probabilidade expandida tendo em conta a fiabilidade da incerteza-padrão $u(y)$ da estimativa da grandeza de saída y . O procedimento de cálculo do factor de expansão k é efectuado através da determinação do número de graus de liberdade efectivos ν_{ef} da estimativa da grandeza de saída y dependente da amostra utilizada [18].

O número de graus de liberdade efectivos ν_{ef} da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y é determinada pela fórmula de *Welch-Satterthwaite* [19].

$$\nu_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (4.21)$$

A contribuição para a incerteza-padrão $u_i(y)$ da estimativa de saída y é definida pela equação 4.16, e ν_i é o número de graus de liberdade efectivos da componente da incerteza-padrão $u_i(y)$, que para uma avaliação do tipo A é dado pela equação 4.22 [19].

$$\nu_i = n - 1 \quad (4.22)$$

No caso de uma avaliação do tipo B é mais problemático associar o número de graus de liberdade efectivos com a incerteza-padrão $u(x_i)$, sendo por norma mais prático fazer uma avaliação a garantir que não foi feita nenhuma subestimação. No caso de uma distribuição rectangular o número de graus de liberdade da incerteza-padrão $u(x_i)$ obtida por uma avaliação do tipo B pode ser tomada como $\nu_i \rightarrow \infty$ [19].

O factor de expansão k é obtido a partir da tabela 4.1 que se baseia numa distribuição *t-student* para a probabilidade expandida. Quando existe um número de graus de liberdade efectivos ν_{ef} elevados considera-se que a distribuição *t-student* aproxima-se de uma distribuição normal com o valor do factor de expansão $k = 2$ correspondendo a uma probabilidade de 95%. Quando o factor de expansão $k = 2$ deverá assumir-se que o número de graus de liberdade efectivos é igual a 50 [19].

Tabela 4. 1: Factores de expansão k para diferentes números de graus de liberdade efectivos ν_{ef}

ν_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

4.8 Resultado da Incerteza de Medição

Na realização da calibração de equipamentos de medição o resultado de medição deverá ser apresentado no certificado de calibração com o valor medido e a incerteza de medição expandida sob a forma da equação 4.23 [18].

$$Y = y \pm U \quad (4.23)$$

É também importante referir que este documento, deverá, no caso geral apresentar uma nota com o seguinte conteúdo:

“A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão $k=XX$, o qual para uma distribuição t com $\nu_{ef} = YY$ graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade de 95% aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EA-04/02” [19].

Capítulo 5: Apresentação e Discussão de Resultados

5.1 Introdução

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos no laboratório aquando da calibração do distanciómetro *Leica DistoTM D2*. A partir desses ensaios foi estabelecido um método experimental e desenvolvido um procedimento técnico de calibração de distanciómetros.

Inicialmente procedeu-se a uma identificação das especificações do distanciómetro com base nas características técnicas. Nesta parte adquiriu-se conhecimentos sobre a utilização do distanciómetro e dos restantes instrumentos de medição necessários para realizar a calibração. Este processo permitiu ainda definir as grandezas de entrada que poderão afectar a incerteza de medição.

São apresentados resultados obtidos nos ensaios com o banco *SIP* de 3 m e a avaliação da incerteza de medição avaliados de acordo com os métodos de avaliação “Tipo A” e “Tipo B”.

São também apresentados os resultados adquiridos nos ensaios com banco de 50 m e a apresentação do balanço de incerteza de medição respectivo.

É ainda expressa a incerteza de medição expandida para os respectivos valores nominais em avaliação ou ensaio.

5.2 Características do distanciómetro

Após o estudo através do manual de utilização do distanciómetro e da identificação das características técnicas e riscos de utilização iniciou-se o processo experimental.

Os primeiros ensaios realizados foram fundamentais para caracterizar o instrumento de medição e permitir o estabelecimento do procedimento de utilização do distanciómetro. As características técnicas descritas na tabela 3.1, nomeadamente no que se refere à gama de medição, permitiu estabelecer um método de avaliação de grandezas de entrada X_i a considerar para o balanço da incerteza de medição.

5.2.1 Gama de Medição

Uma das características técnicas que se encontra mencionada na tabela 3.1 é a gama de medição. A gama de medição é de 59,95 m sendo os valores extremos do intervalo de medição

de 0,05 m e 60 m. Quando se efectua uma medição fora deste alcance o distanciómetro imite um sinal sonoro e exhibe no visor um código identificador de erro *i258*.

Aproveitando o primeiro contacto com os instrumentos de medição do laboratório e com o distanciómetro, foi feita uma verificação dos valores de indicações extremas. Devido ao facto de não existir capacidade no laboratório de comprimento para realizar medições superiores a 50 m, foi feita a verificação para valor mínimo da indicação, referido no manual do distanciómetro, ou seja para 0,05 m.

Para a realização deste ensaio foi utilizado o banco de ensaio *SIP* de 3 m variando-se a sua distância linear entre $L = 45$ mm e $L = 50$ mm

A tabela 5.1 apresenta as indicações no distanciómetro e no padrão de referência, sistema laser interferométrico.

Tabela 5.1: Alcance de medição mínimo

Valor Nominal L (mm)	Indicação no Sistema Laser Interferométrico X_{ref} (mm)	Indicação no Distanciómetro X_i (mm)
45	45,0	<i>i258</i>
46	46,0	<i>i258</i>
47	47,0	<i>i258</i>
48	48,0	<i>i258</i>
49	49,0	49
50	50,0	50

De acordo com a tabela 5.1, o distanciómetro permite a realização de medições abaixo do valor apresentado nas especificações técnicas do manual de utilização.

Para verificar o comportamento do distanciómetro, fez-se deslocar o carro do banco de ensaio *SIP* de 3 m entre $L=48$ mm e $L=49$ mm com intervalos de 0,1 mm. Os resultados apresentados na tabela 5.2 são os valores de indicação do sistema laser interferométrico, o valor de indicação do distanciómetro e o erro de medição respectivo através da aplicação da equação 3.4.

Tabela 5.2: Erro de medição para o alcance de medição mínimo

Indicação no Sistema Laser Interferométrico X_{ref} (mm)	Indicação no Distanciómetro X_i (mm)	Erro de Medição e (mm)
48,0	<i>i258</i>	—
48,1	49	0,9
48,2	49	0,8
48,3	49	0,7
48,4	49	0,6
48,5	49	0,5
48,6	49	0,4
48,7	49	0,3
48,8	49	0,2
48,9	49	0,1
49,0	49	0,0

Para valores de distância inferiores a 49 mm o erro de medição aumenta até ao ponto em que não permite mais a medição, passando a apresentar o erro *i258*. O valor de aquisição do distanciómetro inicia-se a partir dos 49 mm. A partir destes valores podemos concluir que o extremo inferior do intervalo nominal de indicação é de 49 mm, devendo o mesmo ser apresentado no certificado de calibração. Estes dados permitem concluir também que as especificações referidas no manual do distanciómetro para o extremo inferior do intervalo nominal de indicação está correto (pois se mede a partir de 49 mm mede também a partir dos 50 mm especificados).

Os ensaios realizados para obter estes resultados foram de grande relevância, permitindo um primeiro contacto com todos os equipamentos do laboratório necessários para realizar a calibração do distanciómetro.

A utilização dos equipamentos de laboratório, permitiu obter informações sobre o instrumento de medição a calibrar através da identificação de características que possam ser introduzidas como grandezas de entrada X_i a avaliar na incerteza de medição.

5.2.2 Estabilidade do Distanciómetro

O distanciómetro é um instrumento de medição que utiliza um feixe laser para realizar a medição.

O manual de utilização faz referência a que o feixe laser desliga ao fim de 60 segundos, tendo tal indicação sido confirmada aquando da realização dos ensaios para a avaliação do valor extremo do intervalo de indicação mínimo. Outra constatação, feita durante a realização destes ensaios, foi a de que na aquisição da medição do distanciómetro entre $L=49$ mm e $L=50$ mm, após se accionar o feixe laser, se a aquisição fosse realizada num intervalo de tempo curto, o equipamento muitas das vezes exibia no visor o código identificador de erro *i258*.

Destes ensaios se concluiu que a especificação dada no manual para este valor extremo do intervalo nominal de indicação é o que, na prática, deverá ser considerado aquando da realização da calibração.

Quando a aquisição da medição foi realizada após um intervalo de tempo aproximado de 60 s após a activação do feixe de laser, o instrumento de medição efectuava a aquisição da medição.

Em consequência procurou-se identificar qual a influência do tempo de estabilização após a activação do feixe laser (estabilidade do distanciómetro) na indicação de distâncias do distanciómetro.

A partir dos ensaios efectuados para avaliar a estabilidade do distanciómetro, exibidos na tabela A.1 do anexo A, apresentam-se os resultados do seu tratamento estatístico na tabela 5.3, para os respectivos valores nominais, intervalo de tempo da aquisição de medição, média do valor de indicação do distanciómetro (\bar{x}_i), média do valor de indicação do sistema laser interferométrico (\bar{x}_{ref}), erro de medição médio e desvio-padrão ($s(e)$).

Tabela 5.3: Avaliação da estabilidade do distanciómetro

Valor Nominal L (mm)	Tempo t (s)	Indicação no Sistema Laser Interferométrico \bar{x}_{ref} (mm)	Indicação no Distanciómetro \bar{x}_i (mm)	Erro de Medição e (mm)	Desvio-Padrão $s(e)$ (mm)
500	30	499,9996	500,7	0,7	0,5
	60	499,9998	501,0	1,0	0,0
2500	30	2500,0000	2500,9	0,9	0,3
	60	2500,0001	2501,0	1,0	0,0

De acordo com a tabela 5.3, para ambos os valores nominais considerados na medição o distanciómetro tem idêntico comportamento de leitura da medição para $t = 60$ s, após o accionamento do equipamento e de seguida a activação do feixe laser.

Este tempo é o suficiente para activar o distanciómetro e activar o laser, estando o feixe ligado até momentos antes de adquirir a medição sem que este desactive o feixe automaticamente, o que permite que o feixe esteja estabilizado quando na aquisição da medição.

Para comprovar que o feixe laser estabiliza momentos antes de desactivar o feixe, podemos relacionar o desvio-padrão. Como podemos observar na tabela 5.3 que o desvio-padrão para $t = 60$ s é $s(\bar{e}) = 0$ mm, enquanto para $t = 30$ s o desvio padrão é $s(\bar{e}) = 0,5$ mm para o valor nominal de $L = 500$ mm e de $s(\bar{e}) = 0,3$ mm para o valor nominal de $L = 2500$ mm.

Este parâmetro, que designamos por “estabilidade do distanciómetro” é uma grandeza de entrada X_i , correspondendo a uma fonte de incerteza a ter em consideração no balanço de incerteza $u(y)$.

5.3 Avaliação das Grandezas de Entrada X_i com o Banco *SIP* de 3 m

Para a obtenção dos resultados de medição foram feitas várias medições e registadas as indicações no distanciómetro e interferómetro. A partir destes valores efectuou-se a avaliação da incerteza-padrão considerando o método de avaliação do “Tipo A”. Neste processo em que se utilizou o banco de ensaios *SIP* de 3 m, analisaram-se outras grandezas de entrada X_i a considerar na avaliação do balanço de incerteza de medição e a aplicar no futuro quando se utilizar o banco de 50 m, para efectuar a calibração dos distanciómetros.

Foram também analisadas fontes de incerteza cuja avaliação é realizada através do método de avaliação “Tipo B”.

5.3.1 Método de Avaliação “Tipo A”

Como foi referido anteriormente no capítulo 3 e no capítulo 4, a avaliação “Tipo A” é um método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Esta análise estatística de valores medidos pode ser utilizada quando há repetibilidade ou reprodutibilidade na aquisição das medições.

5.3.1.1 Repetibilidade

Os valores de medição foram realizados em condições de repetibilidade e para um número, n de cinco aquisições para os valores nominais de $L=500$ mm a $L=3000$ mm, com um passo de 500 mm.

A tabela 5.4 apresenta o valor médio das indicações do distanciômetro, ou seja o valor medido, q , e o desvio-padrão para cada valor nominal dos ensaios (ver tabela A.2 do anexo A). O valor medido e o desvio-padrão foram calculados respectivamente pela equação 4.1 e equação 4.2.

Tabela 5.4: Valores de repetibilidade até ao valor nominal $L=3000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Valor Médio Medido pelo Distanciômetro \bar{q} (mm)	Desvio-padrão $s(q)$ (mm)
500	499,8	0,6
1000	1000,0	0,6
1500	1499,0	0,6
2000	1999,0	0,6
2500	2500,0	0,6
3000	3000,0	0,0

A tabela 5.4 apresenta o valor máximo do $s(q)$ obtido nos vários ensaios e podemos resumir que, para os ensaios realizados, a fonte de incerteza devida à repetibilidade (cujo método de avaliação é o do “Tipo A”) regra geral este parâmetro é constante para os valores nominais em avaliação.

5.3.1.2 Reprodutibilidade

Os valores obtidos em condições de reprodutibilidade foram registados através de aquisições realizadas no banco de ensaios *SIP* de 3 m em 3 percursos de *up* e *down*, para os valores nominais de $L=500$ mm a $L=3000$ mm, com um passo de 500 mm e em dias distintos.

A tabela A.3 do anexo A apresenta os valores de medição do ensaio de reprodutibilidade, utilizados na análise estatística expressa na tabela 5.5. Nesta apresentamos o valor do erro de medição e o desvio padrão respectivo em função dos valores nominais em ensaio. O erro de medição apresentado na tabela 5.5 é dado pela média dos valores de indicação para cada valor nominal de distância, através da adaptação da equação 3.4, originando a equação 5.1.

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (5.1)$$

O desvio-padrão é calculado através da equação 5.2.

$$s(e) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (5.2)$$

Tabela 5. 5: Valores de reprodutibilidade até ao valor nominal $L=3000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Erro de Medição \bar{e} (mm)	Desvio-padrão $s(e)$ (mm)
500	-1,0	0,6
1000	-0,1	0,2
1500	-0,9	0,2
2000	-0,8	0,3
2500	-0,3	0,3
3000	-0,5	0,5

Analisando a tabela 5.5 pode verificar-se que o valor nominal $L=500$ mm é o que tem maiores valores de desvio padrão e erro de medição. Este resultado pode ser justificado pelo facto de que o princípio de funcionamento do distanciómetro tem dificuldade de leitura por parte do *software* para curtas distâncias.

5.3.2 Método de Avaliação de “Tipo B”

O método de avaliação “Tipo B” para algumas das fontes de incerteza de medição é baseado noutros conhecimentos científicos, que não o da análise estatística de séries de observações.

A introdução de grandezas de entrada X_i , cuja avaliação de incerteza é de Tipo B, é apoiada pelas especificações dos manuais de utilização dos equipamentos, literatura de referência e prática experimental.

5.3.2.1 Padrão de Referência

O padrão de referência utilizado na realização dos ensaios com o banco *SIP* de 3 m foi o sistema laser interferométrico *Hewlett-Packard (HP)*.

Como padrão de referência, este equipamento constitui uma grandeza de entrada no balanço de incerteza de medição. A incerteza-padrão associada ao padrão de referência é obtida pela equação 5.3.

$$u(ref_{HP}) = \frac{U}{k} \quad (5.3)$$

Onde U é a incerteza de medição expandida e k o factor de expansão, expressos no Certificado de Calibração do sistema laser interferométrico *HP*.

A incerteza de medição expandida para o sistema laser interferométrico *HP* tem o valor de $U = 6,3 \times 10^{-12}$ mm para um factor de expansão $k = 2$, o qual, para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente 95% [21].

A tabela 5.6 apresenta a contribuição para a incerteza-padrão obtida pela equação 5.3 para os respectivos valores nominais.

Tabela 5. 6: Avaliação da incerteza-padrão para o padrão de referência *HP*

Valor Nominal <i>L (mm)</i>	Incerteza-padrão para o padrão de referência <i>HP</i> $u(ref_{HP})$ (mm)
500	$1,6 \times 10^{-9}$
1000	$3,2 \times 10^{-9}$
1500	$4,7 \times 10^{-9}$
2000	$6,3 \times 10^{-9}$
2500	$7,9 \times 10^{-9}$
3000	$9,5 \times 10^{-9}$

5.3.2.2 Erro do coseno

O erro do coseno está presente quando se realizam medições com o sistema laser interferométrico quando o carro do banco de ensaio é deslocado ao longo duma distância linear, e exista uma mudança do espaçamento entre os dois feixes lasers que incidem no orifício da unidade laser [13].

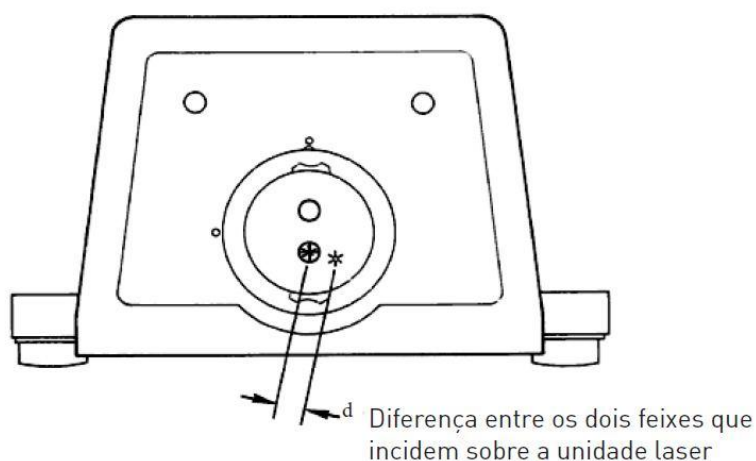


Figura 5.1: Verificação do erro do coseno [13]

A incerteza-padrão associada ao erro do coseno é dada pela equação 5.4 [13].

$$u(cos) = \frac{d^2}{8D^2} \quad (5.4)$$

Onde d é a diferença entre os dois feixes que incidem na unidade laser e D é a distância percorrida pelo cubo retroreflector móvel. Para a realização dos ensaios no banco *SIP* de 3 m utilizou-se o sistema laser interferométrico *HP*.

Na tentativa de quantificar o valor mais razoável da diferença dos feixes que incidem na unidade laser (d) optou-se por maximizar esta diferença, adoptando o diâmetro do orifício que recebe os feixes na unidade laser como a diferença entre estes. Assim sendo, o valor adoptado para a diferença dos feixes que incidem na unidade laser foi de $d = 6,5$ mm.

A distância percorrida pelo cubo retroreflector móvel D , para os ensaios específicos foi o mesmo que o valor nominal.

A tabela 5.7 apresenta os valores da incerteza-padrão para os respectivos valores nominais.

Tabela 5.7: Avaliação da incerteza-padrão para erro do coseno para os valores nominal $L=3000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Incerteza-padrão do erro do coseno $u(\cos)$ (mm)
500	0,011
1000	0,0053
1500	0,0035
2000	0,0026
2500	0,0021
3000	0,0018

5.3.2.3 Resolução de um Dispositivo Afixador

A resolução de um dispositivo afixador é a menor diferença entre indicações afixadas que podem ser distinguidas significativamente [1].

A resolução do dispositivo afixador do distanciómetro *Leica DistoTM D2* tem o valor de $r = 1$ mm.

Tomando em consideração a equação 4.8, calculou-se a incerteza-padrão associada à estimativa da resolução de um dispositivo afixador para o distanciómetro através da equação 5.5, com atribuição de uma distribuição rectangular de intervalo $\left[-\frac{r}{2}, +\frac{r}{2}\right]$, com a estimativa dentro de um intervalo de limite superior e inferior a_+ e a_- igual a $r/2$ da grandeza de entrada X_i (resolução do dispositivo afixador).

$$u(r) = \frac{\frac{r}{2}}{\sqrt{3}} \quad (5.5)$$

A incerteza-padrão associada à estimativa da resolução de um dispositivo afixador tem o valor de $u(r) = 0,29$ mm.

5.4 Balanço da Incerteza de Medição com o Banco *SIP* de 3 m

Realizados os ensaios previstos com o banco *SIP* de 3 m, e efectuada a respectiva análise estatística das grandezas de entrada da avaliação de acordo com o método Tipo A e identificadas as grandezas de entrada da avaliação Tipo B, pretende-se neste ponto fazer um resumo das informações obtidas com o equipamento a calibrar e com o padrão de referência e realizar o balanço da incerteza de medição.

As fontes de incerteza identificadas para o balanço de incerteza foram:

- A estabilidade do distanciómetro: assumiu-se que a estabilidade do distanciómetro pode ser avaliada através da repetibilidade dos valores de indicação do instrumento de medição;
- A reprodutibilidade;
- A resolução de um dispositivo afixador;
- O erro do coseno;
- O padrão de referência;

A tabela 5.8 resume o balanço da incerteza de medição para a calibração do distanciômetro com o banco de ensaios *SIP* 3 m.

Tabela 5. 8: Balanço da incerteza de medição para o banco de ensaio *SIP* de 3 m

Componente da incerteza-padrão $u(x_i)$	Distribuição	Incerteza- padrão $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza- padrão $u_i(y)$
Sistema Laser Interferométrico HP				
Padrão de Referência $u(ref_{HP})$	Normal	$\frac{U}{k}$	1	$\frac{U}{k}$
Erro do Coseno $u(cos)$	Rectangular	$\frac{d^2}{8D^2}$	L	$\frac{d^2}{8D^2} L$
Distanciômetro				
Repetibilidade $u(q)$	Normal	$s(q)$	1	$s(q)$
Reprodutibilidade $u(e)$	Normal	$s(e)$	1	$s(e)$
Resolução do Dispositivo Afixador $u(r)$	Rectangular	$\frac{r}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{r}{\sqrt{3}}$

5.5 Avaliação das Grandezas de Entrada X_i no Banco de 50 m

Após a avaliação do balanço de incerteza de medição para o banco de ensaios *SIP* de 3 m, foram realizadas diversas medições e registadas as indicações do distanciómetro e interferómetro para o banco de ensaios de 50 m. A recolha de dados permitiu realizar a avaliação da incerteza-padrão considerando o método de avaliação do “tipo A”. Este método foi utilizado em duas etapas, com a recolha de indicação dos valores de medição numa primeira etapa até o valor nominal $L = 30000$ mm, e numa segunda etapa, até ao valor nominal de $L = 50000$ mm.

Foram também analisadas fontes de incerteza cuja avaliação é realizada através do método de avaliação “Tipo B”, para o banco de ensaios de 50 m.

5.5.1 Método de Avaliação de “Tipo A” até 30 m

Os ensaios realizados no banco de ensaios de 50 m, numa primeira fase, foram realizados para o valor nominal até aos 30 m, devido à falta de capacidade de alinhamento do banco de ensaios na totalidade da sua gama de medição nesta fase.

As medições realizadas para o método de avaliação do “tipo A” foram efectuadas nas condições de repetibilidade e de reprodutibilidade.

5.5.1.1 Repetibilidade

Os valores de medição foram realizados em condições de repetibilidade e para um número, n de cinco aquisições para os valores nominais de $L=5000$ mm a $L=30000$ mm, com um passo de 5000 mm.

A tabela 5.9 representa o valor médio das indicações do distanciómetro e o seu desvio-padrão para cada valor nominal dos ensaios (ver tabela B.1 do anexo B). O valor medido e o desvio-padrão foram calculados respectivamente pela equação 4.1 e equação 4.2, respectivamente.

A tabela 5.9 apresenta o valor máximo do $s(q)$ obtido nos vários ensaios e podemos resumir que, para os ensaios realizados, a fonte de incerteza devida à repetibilidade (cujo método de avaliação é o do “Tipo A”) vai aumentado para os valores nominais em avaliação.

Tabela 5. 9: Valores de repetibilidade até ao valor nominal $L=30000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Valor Médio medido pelo Distanciômetro \bar{q} (mm)	Desvio-padrão $s(q)$ (mm)
5000	5000,0	0,6
10000	10000,0	0,6
15000	14998,0	0,9
20000	19997,0	0,8
25000	25003,0	1,1
30000	29993,2	2,7

5.5.1.2 Reprodutibilidade

Os valores obtidos em condições de reprodutibilidade foram registados através de aquisições realizadas ao longo do banco de ensaios de 50 m em 3 percursos de *up* e *down*, para os valores nominais de $L=5000$ mm a $L=30000$ mm, com um passo de 5000 mm e em dias distintos.

A tabela 5.10 apresenta a análise estatística das aquisições realizadas para os valores de medição do ensaio de reprodutibilidade descritos na tabela B.2 do anexo B. Na tabela 5.10 apresentamos o valor do erro de medição e o desvio padrão respectivo em função dos valores nominais em ensaio. O erro de medição apresentado na tabela 5.10 é dado pela média dos valores de indicação para cada valor nominal de distância através da equação 5.1.

Tabela 5.10: Valores de reprodutibilidade até ao valor nominal $L=30000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Erro de Medição \bar{e} (mm)	Desvio-padrão $s(e)$ (mm)
5000	-0,4	0,3
10000	-0,5	0,6
15000	-1,7	0,5
20000	-2,6	0,9
25000	-0,7	0,8
30000	-6,7	1,1

Analisando a tabela 5.10 pode verificar-se que o valor nominal $L = 25000$ mm tem um comportamento diferente à tendência demonstrada pelos restantes valores do erro de medição tendo sido verificada uma diminuição do valor do erro de medição.

A figura 5.2 permite observar de forma mais pormenorizada a variação do erro de medição para cada valor nominal, ficando evidente o comportamento do erro de medição para o valor nominal $L = 25000$ mm ter um comportamento diferente. Pode ainda constatar-se que o valor nominal $L = 30000$ mm tem um aumento muito significativo do erro de medição relativamente aos outros valores nominais.

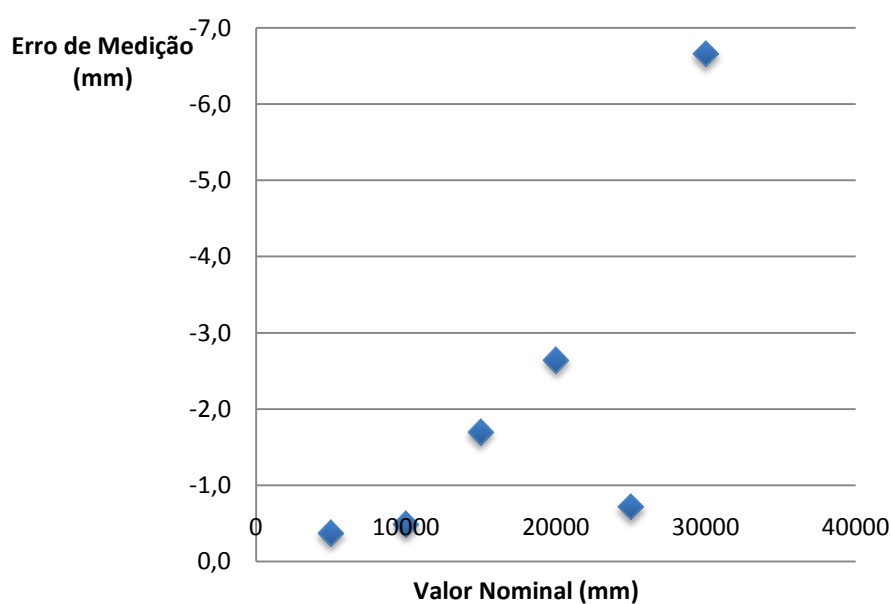


Figura 5. 2: Erro de medição em função dos valores nominais avaliados

5.5.2 Método de Avaliação de Tipo A até 50 m

Analizados os resultados obtidos nos ensaios até ao valor nominal $L = 30000$ mm, ficou a faltar a verificação do comportamento do distanciómetro para a restante gama de medição ($L = 30000$ mm a $L = 50000$ mm). Existindo a possibilidade de efectuar ensaios de medição numa gama de medição até 50 m, realizou-se novamente o alinhamento do banco de ensaios até à totalidade da sua gama de medição.

As medições realizadas para o método de avaliação do “tipo A” foram efectuadas nas condições de repetibilidade e de reprodutibilidade.

5.5.2.1 Repetibilidade

Os valores de medição foram realizados em condições de repetibilidade e para um número, n de cinco aquisições para os valores nominais de $L=5000$ mm a $L=50000$ mm, com um passo de 5000 mm.

A tabela 5.11 representa o valor médio das indicações do distanciómetro e do desvio-padrão para cada valor nominal dos ensaios apresentados na tabela B.3 do anexo B. O valor medido e o desvio-padrão foram calculados respectivamente pela equação 4.1 e equação 4.2, respectivamente.

A tabela 5.11 apresenta o valor máximo do $s(q)$ obtido nos vários ensaios. Pode resumir-se que, para os ensaios realizados, a fonte de incerteza devida à repetibilidade (cujo método de avaliação é o do “Tipo A”) vai, regra geral, aumentado para os valores nominais em avaliação.

Tabela 5. 11: Valores de repetibilidade até ao valor nominal $L=50000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Média do Valor do Distanciómetro \bar{q} (mm)	Desvio-padrão $s(q)$ (mm)
5000	5000,0	0,6
10000	10000,0	0,8
15000	15000,0	0,7
20000	19999,0	1,1
25000	25001,0	1,1
30000	29994,8	2,2
35000	34984,8	2,9
40000	39984,6	3,0
45000	44969,4	3,4
50000	49973,6	2,7

5.5.2.2 Reprodutibilidade

Os valores obtidos em condições de reprodutibilidade foram registados através de aquisições realizadas ao longo do banco de ensaios de 50 m em 3 percursos de *up* e *down*, para os valores nominais de $L=5000$ mm a $L=50000$ mm, com um passo de 5000 mm e em dias distintos.

A tabela 5.12 apresenta a análise estatística das aquisições realizadas para os valores de medição do ensaio de reprodutibilidade descritos na tabela B.4 do anexo B. Na tabela 5.12 apresentam-se o valor do erro de medição e o desvio padrão respectivo em função dos valores nominais em ensaio. O erro de medição apresentado na tabela 5.12 é dado pela média dos valores de indicação para cada valor nominal de distância através da equação 5.1.

Tabela 5. 12: Valores de reprodutibilidade até ao valor nominal $L=50000$ mm

Valor Nominal <i>L (mm)</i>	Erro de Medição <i>\bar{e} (mm)</i>	Desvio-padrão <i>s(e) (mm)</i>
5000	- 0,1	0,4
10000	0,3	0,7
15000	- 0,4	0,8
20000	-2,2	0,8
25000	-0,9	1,3
30000	-6,5	1,3
35000	-13,3	2,1
40000	-17,5	2,4
45000	-22,9	5,0
50000	-29,9	2,2

Analisando a tabela 5.12 pode verificar-se que o valor nominal $L = 25000$ mm mantém um comportamento diferente aos restantes valores do erro de medição. Relativamente ao valor nominal $L = 45000$ m, o seu desvio-padrão é demasiadamente elevado comparativamente com os restantes valores do desvio-padrão.

A figura 5.3 apresenta a variação do erro de medição ao longo do valor nominal, onde se pode constatar que o valor nominal $L = 25000$ mm tem uma oscilação contrária aos restantes valores obtidos.

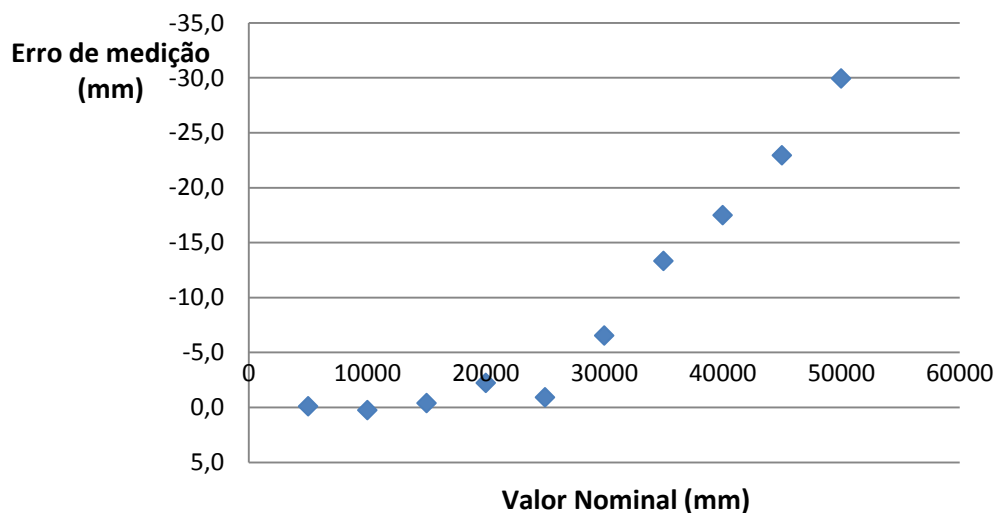


Figura 5. 3: Variação do erro de medição com o respectivo valor nominal

5.5.3 Método de Avaliação de Tipo B

O método de avaliação “Tipo B” para algumas das fontes de incerteza de medição é baseada noutros conhecimentos científicos, que não o da análise estatística de séries de observações.

A introdução de grandezas de entrada X_i , cuja avaliação de incerteza é de “Tipo B”, é apoiada pelas especificações dos manuais de utilização dos equipamentos, literatura de referência e prática experimental.

Pretende-se avaliar o método de avaliação do “Tipo B” para os respectivos valores nominais entre $L = 5000$ mm e $L = 50000$ mm, com um passo de 5000 mm.

5.5.3.1 Padrão de Referência

O padrão de referência utilizado nos ensaios do banco de 50 m foi o sistema laser interferométrico *Spindler & Hoyle* (SH).

A incerteza-padrão associada ao padrão de referência do sistema laser interferométrico é obtido pela equação 5.3.

O valor da incerteza de medição expandida e o factor de expansão são obtidos a partir do certificado de calibração do sistema laser interferométrico SH.

A incerteza de medição expandida para o sistema laser interferométrico *SH* tem o valor de $U = 1,5 \times 10^{-12}$ mm para um factor de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente 95% [22].

A tabela 5.13 apresenta a contribuição para a incerteza-padrão obtida pela equação 5.3 para os respectivos valores nominais.

Tabela 5. 13: Avaliação da incerteza-padrão para o padrão de referência *SH*

Valor Nominal L (mm)	Incerteza-padrão para o padrão de referência HP $u(ref_{HP})$ (mm)
5000	$3,8 \times 10^{-9}$
10000	$7,5 \times 10^{-9}$
15000	$1,1 \times 10^{-8}$
20000	$1,5 \times 10^{-8}$
25000	$1,9 \times 10^{-8}$
30000	$2,3 \times 10^{-8}$
35000	$2,6 \times 10^{-8}$
40000	$3,0 \times 10^{-8}$
45000	$3,4 \times 10^{-8}$
50000	$3,8 \times 10^{-8}$

5.5.3.2 Erro do coseno

Nos ensaios realizados no banco de ensaios de 50 m existe a necessidade de efectuar nova avaliação do erro do coseno devido ao facto de ter sido feita aquisição de novos valores nominais e se ter utilizado um outro sistema laser interferométrico.

Nos ensaios realizados na obtenção de valores nominais entre $L = 5000$ mm e $L = 30000$ mm e dos valores entre $L = 5000$ mm e $L = 50000$ mm utilizou-se o sistema laser interferométrico *SH*.

A avaliação da incerteza-padrão associada ao erro do cosseno para este sistema laser interferométrico foi realizada nas mesmas circunstâncias, que aquela que foi desenvolvida no ponto 5.3.2.2, adaptando o diâmetro do orifício que recebe os feixes na unidade laser como a diferença entre os feixes que incidem nesta unidade d .

Assim sendo, o valor adoptado para a diferença dos feixes que incidem na unidade laser é de $d = 11$ mm.

Aplicando a equação 5.4 obteve-se na tabela 5.14 os valores da incerteza-padrão associada ao erro do cosseno para os respectivos valores nominais.

Tabela 5.14: Avaliação da incerteza-padrão para erro do cosseno até ao valor nominal $L=50000$ mm

Valor Nominal L (mm)	Incerteza-padrão do erro do cosseno $u(\cos)$ (mm)
5000	0,0030
10000	0,0015
15000	0,0010
20000	0,00076
25000	0,00061
30000	0,00050
35000	0,00043
40000	0,00038
45000	0,00034
50000	0,00030

5.5.3.3 Alinhamento do Distanciómetro

No desenvolvimento das precedências necessárias para a realização da aquisição dos valores nominais no banco de ensaio de 50 m, registou-se uma maior dificuldade no alinhamento do distanciómetro em relação ao alvo, tal como foi referido no capítulo 3 na metodologia, o que não tinha ocorrido no banco de ensaio *SIP* de 3 m.

Na deslocação linear do sistema de movimentação verificou-se que, entre os $L = 10000$ mm e $L = 15000$ mm, se verificava pela primeira vez a tendência para o deslocamento do feixe laser do centro da placa alvo para uma das extremidades.

A prática permite desenvolver conhecimentos sobre os equipamentos utilizados, permitindo concluir sobre a introdução do alinhamento do distanciómetro como grandeza de entrada X_i e como fonte de incerteza Tipo B na avaliação da incerteza-padrão.

A avaliação desta grandeza foi efectuada considerando-se que o desalinhamento máximo que permite realizar a medição da distância do distanciómetro à placa alvo, encontra-se no limite da superfície da placa alvo, que tem de lado $l = 40$ mm.

Considerando que o valor nominal $L = 50000$ mm é a distância máxima entre a placa alvo e o distanciómetro, e que desalinhamento máximo que o feixe laser pode sofrer é metade do lado da placa alvo $\frac{l}{2} = 20$ mm, calcula-se o ângulo máximo através da equação trigonométrica 5.6.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\frac{l}{2}}{L_{\max}} \quad (5.6)$$

A equação 5.6 permite determinar o ângulo α que é função do valor nominal possibilitando o cálculo da distância do distanciómetro d_{dist} à placa alvo aplicando a equação 5.7.

$$d_{dist} = \frac{L}{\cos \alpha} \quad (5.7)$$

A incerteza-padrão associada ao alinhamento do distanciómetro $u(al_{dist})$ é obtida pela equação 5.8.

$$u(al_{dist}) = \frac{|L - d_{dist}|}{\sqrt{3}} \quad (5.8)$$

A tabela 5.15 apresenta a incerteza-padrão associada ao alinhamento do distanciómetro para os respectivos valores nominais.

Tabela 5.15: Avaliação da incerteza-padrão para o alinhamento do distanciómetro

Valor Nominal L (mm)	Incerteza-padrão do alinhamento do distanciómetro $u(al_{dist})$ (mm)
5000	0,00023
10000	0,00047
15000	0,00070
20000	0,00093
25000	0,0012
30000	0,0014
35000	0,0016
40000	0,0019
45000	0,0021
50000	0,0023

5.6 Balanço de Incerteza de Medição

Realizados os ensaios previstos para o banco de ensaios de 50 m e extrapolados os resultados dos ensaios com o banco *SIP* de 3 m efectuou-se o balanço da incerteza de medição utilizado no cálculo da incerteza de medição expandida.

A avaliação das grandezas de entrada na incerteza de medição para os ensaios efectuados no banco de 50 m permitiu analisar uma nova grandeza (Alinhamento do distanciómetro), para além das grandezas extrapoladas nos ensaios do banco *SIP* de 3 m com a sua avaliação para os novos valores nominais.

A tabela 5.16 apresenta o balanço final da incerteza de medição para a calibração do distanciómetro para os valores nominais de $L = 5000$ mm a $L = 50000$ mm.

Tabela 5. 16: Balanço da incerteza de medição final

Componente da incerteza-padrão $u(x_i)$	Distribuição	Incerteza- padrão $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza- padrão $u_i(y)$
Sistema Laser Interferométrico SH				
Padrão de Referência $u(ref_{HP})$	Normal	$\frac{U}{k}$	1	$\frac{U}{k}$
Erro do Coseno $u(cos)$	Rectangular	$\frac{d^2}{8D^2}$	L	$\frac{d^2}{8D^2}L$
Distanciômetro				
Repetibilidade $u(q)$	Normal	$s(q)$	1	$s(q)$
Reprodutibilidade $u(e)$	Normal	$s(e)$	1	$s(e)$
Resolução de um Dispositivo Afixador $u(r)$	Rectangular	$\frac{r}{\frac{2}{\sqrt{3}}}$	1	$\frac{r}{\frac{2}{\sqrt{3}}}$
Alinhamento do Distanciômetro $u(ali_{dist})$	Rectangular	$\frac{ L - d_{dist} }{\sqrt{3}}$	1	$\frac{ L - d_{dist} }{\sqrt{3}}$

5.7 Incerteza de Medição Expandida

Avaliado o balanço da incerteza de medição procura-se determinar a incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ aplicando a equação 4.15.

A incerteza de medição expandida é calculada através da equação 4.20 a partir da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ determinada no balanço da incerteza de medição apresentado nas tabelas C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 e C9 do anexo C.

A tabela 5.17 apresenta a incerteza de medição expandida para os respectivos valores nominais.

Tabela 5. 17: Incerteza de medição expandida

Valor Nominal L (mm)	Incerteza de Medição Expandida U (mm)
5000	1,5
10000	2,2
15000	2,2
20000	2,7
25000	3,5
30000	5,1
35000	7,2
40000	7,8
45000	12
50000	7,0

Os valores apresentados na tabela 5.17 da incerteza de medição expandida foram expressas pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de 95% aproximadamente.

5.8 Expressão da Incerteza de Medição e Certificado de Calibração

Nos certificados de calibração o resultado completo da medição é expresso pela estimativa da mensuranda y e pela incerteza de medição expandida U através da equação 4.25.

O certificado de calibração do instrumento de medição distanciômetro deverá apresentação dos resultados através da seguinte tabela 5.18.

Tabela 5. 18: Apresentação dos resultados no certificado de calibração /relatório de ensaio

Valor Nominal L (mm)	Erro de Medição e (mm)	Incerteza de Medição Expandida U (mm)
5000	– 0,1	1,5
10000	0,3	2,2
15000	– 0,4	2,2
20000	–2,2	2,7
25000	–0,9	3,5
30000	–6,5	5,1
35000	–13,3	7,2
40000	–17,5	7,8
45000	–22,9	12
50000	–29,9	7,0

O certificado de calibração é apresentado com a tabela 5.18 com a descrição resumida do método, como se pode confirmar através do relatório de ensaio apresentado no anexo D.

O método é obtido através do resumo do procedimento técnico apresentado no anexo E.

Capítulo 6: Projecto do Equipamento de Medição de Longo Alcance

6.1 Introdução

O presente capítulo tem o objectivo de desenvolver a segunda parte da dissertação, respeitante ao estudo e desenvolvimento de um equipamento de medição de longo alcance.

O projecto iniciou-se com a realização do seu enquadramento e com o desenvolvimento da conceptualização, através de uma descrição dos principais requisitos de projecto. A conceptualização de projecto visa também apresentar uma solução construtiva, com a definição de materiais, acessórios e funções a desempenhar.

São apresentados os dimensionamentos efectuados, com a intenção de justificar e viabilizar a solução construtiva encontrada.

É ainda feita uma descrição do *hardware* e *software* necessários, com o objectivo fornecer capacidade de aquisição de dados, aquisição de imagem e controlo programável do movimento.

6.2 Enquadramento do Projecto

O equipamento de medição de longo alcance (Banco de ensaios de 50 m) permitirá ao Laboratório de comprimento (LCO) da Unidade de Metrologia Científica e Aplicada – Laboratório Central de Metrologia (UMCA-LCM) do Instituto Português da Qualidade (IPQ) adquirir valências na realização de ensaios de calibração/verificação de instrumentos de medição de distâncias numa gama de medição até 50 m.

O LCO na procura continuada de melhoria e capacidade de responder a novos processos de calibração e de controlo metrológico, pretende implementar um equipamento de medição de longo alcance automatizado, desenvolvido por um sistema de apoio, movimentação e alinhamento de um carro motorizado, por controlo remoto.

O projecto deverá ser implementado num espaço destinado aos bancos de ensaios no LCO, substituindo o banco de ensaios de 50 m já existente (Figura 3.7).

O equipamento de medição de longo alcance é constituído principalmente pelo banco de ensaios e pelo sistema laser interferométrico.

O banco de ensaios é dividido em três sistemas principais: sistema de suporte/apoio, sistema de movimentação e sistema de visualização/captação de imagem.

Ao todo, o equipamento de medição de longo alcance é constituído por quatro sistemas, três sistemas do banco de ensaios, e um outro, sistema óptico, constituído pelo sistema laser interferométrico.

A realização da primeira parte da presente dissertação foi importante, possibilitando obter conhecimentos sobre metrologia, experiência laboratorial, nomeadamente na utilização de instrumentos de medição e bancos de ensaios, permitindo desenvolver a conceptualização e realização do projecto de detalhe do banco de ensaios de 50 m.

6.3 Conceptualização de Projecto

A conceptualização de projecto foi desenvolvida com a finalidade de concretizar os objectivos propostos no capítulo 1 para o equipamento de medição de longo alcance, apresentando as principais especificações de projecto.

As especificações de projecto visam identificar as funcionalidades necessárias do banco de ensaios, permitindo desenvolver o objectivo através da definição de soluções de projecto capazes de viabilizar a utilização do equipamento tendo em consideração a finalidade a que ele se destina.

6.3.1 Especificações de Projecto

O estudo e desenvolvimento do projecto foram realizados a partir da identificação das limitações, especificações técnicas, materiais existentes no mercado e custos de projecto.

As limitações do projecto são de diversa ordem, nomeadamente as limitações referentes ao espaço físico do laboratório onde se pretende implementar o banco de ensaios, assim como as limitações de cada sistema no qual o equipamento de medição de longo alcance foi dividido.

Relativamente ao espaço físico do laboratório, este tem uma área de $60 \times 3 \text{ m}^2$ contendo já diversos equipamentos, móveis e bancos de ensaios. Analisando o *layout* do laboratório ficou comprovado que existe uma limitação na largura do banco de ensaios a projectar, restando apenas 1,55 m, e deixar um corredor de passagem para a movimentação dos técnicos de laboratório.

Apresenta-se seguidamente as limitações e especificações técnicas detalhadas para cada sistema que constitui o equipamento de medição de longo alcance:

- O sistema de suporte/apoio tem de ser desenvolvido com capacidade de regulação da posição em altura e segundo a direcção transversal, que permitam a utilização de componentes ópticos ao longo de uma distância linear com rectilismo inferior a 1 mm;
- O sistema de movimentação tem de ser constituído por um carro motorizado com controlo remoto, com capacidade de se deslocar linearmente ao longo da gama de medição até 50 m, permitindo uma aproximação lenta, seguida de paragem do ponto da escala que se pretende medir;
- O sistema óptico a aplicar no equipamento de medição de longo alcance irá ser um sistema laser interferométrico, com a particularidade de ser o padrão de referência na comparação com os valores de indicação dos instrumentos de medição a calibrar/verificar, estando um dos componentes ópticos acoplados ao sistema de movimentação e os restantes componentes ópticos estarão solidários ao sistema de suporte/apoio;
- O sistema de visualização/captação de imagem tem de ter a capacidade de leitura das marcas de escala dos valores de indicação das medidas materializadas de comprimento;
- Apesar do laboratório onde se pretende implementar o projecto se encontrar em condições ambientais controladas, e a sua actividade ser exercida num espaço limpo, existe necessidade de constituir o banco de ensaios com materiais que não necessitem de manutenção ou outro tipo qualquer de cuidados em especial;
- Procurou-se utilizar componentes existentes no mercado, que permitam a sua fácil aquisição e permitir uma redução de custos aquando na implementação do projecto;

6.3.2 Solução de Projecto

Pretende-se apresentar uma explicação detalhada da solução de projecto encontrada, através da descrição de cada componente que constitui o equipamento de medição de longo alcance.

A solução de projecto, para além de identificar os componentes que constituem cada um dos sistemas, visa também descrever a aplicação/função de cada sistema que constitui o equipamento de medição de longo alcance (Figura 6.1).

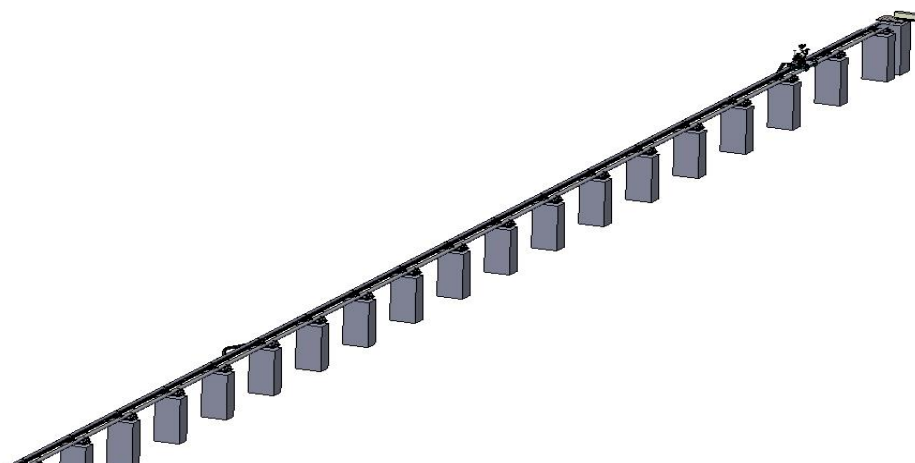


Figura 6. 1: Equipamento de medição de longo alcance

6.3.2.1 Sistema de Suporte/Apoio

O sistema de suporte/apoio constitui a parte estrutural do banco de ensaios, sendo constituído por diversos componentes. A figura 6.2 apresenta uma imagem com a identificação e constituição dos principais componentes do sistema de suporte/apoio do equipamento de medição de longo alcance.

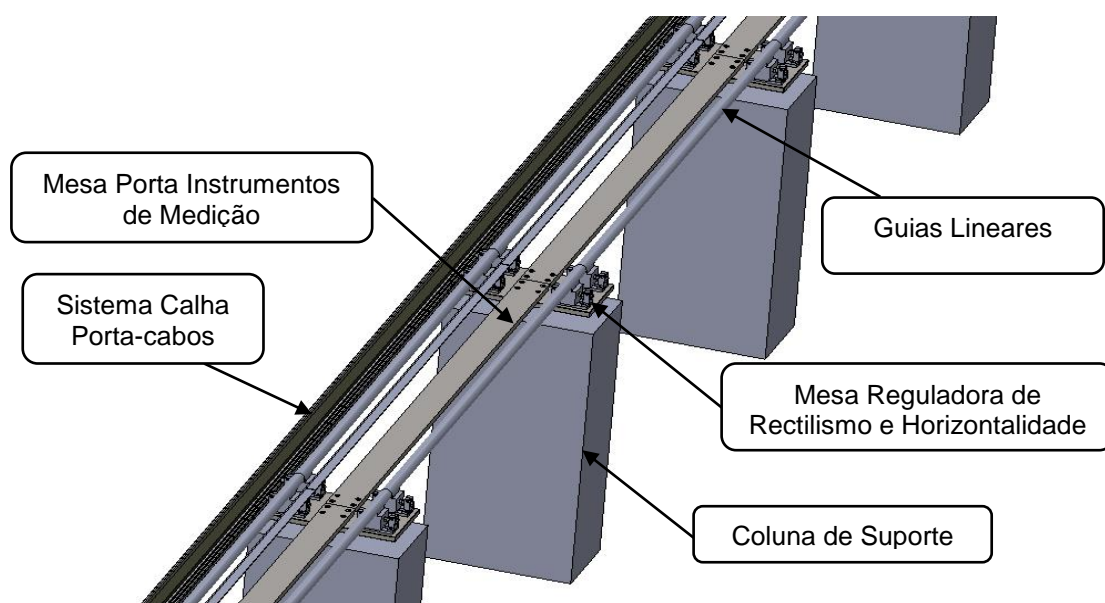


Figura 6. 2: Identificação e constituição do sistema de suporte/Apoio

A coluna de suporte em betão foi a solução encontrada para dar altura ao equipamento, fazendo também a ligação do chão aos restantes componentes que constituem o sistema de

suporte/apoio. Este componente (coluna de suporte em betão) encontra-se uniformemente distribuído ao longo do comprimento do banco de ensaios. As colunas de suporte foram pensadas para serem construídas em betão, sendo uma excelente opção, já que têm uma grande capacidade de carga e os custos associados à sua construção são relativamente baixos, quando comparados com outras soluções possíveis.

A mesa de regulação do rectilismo e horizontalidade é também um componente muito importante em todo o projecto do equipamento de medição de longo alcance, respondendo a um dos principais requisitos de projecto: rectilismo inferior a 1 mm.

A solução construtiva encontrada para este componente (Figura 6.3) foi criada de raiz, embora tenha sido adaptada dos modelos de bancos de ensaios utilizados na parte experimental da presente dissertação. A adaptação realizada para este componente foi pensada para permitir obter a horizontalidade do equipamento, utilizando a técnica desenvolvida tanto no banco de ensaios *SIP* de 3 m, como no banco de ensaios de 50 m, onde estes estão apoiados por três pontos distintos que definem um plano. Assim, acoplou-se uma chapa de aço inoxidável através de três fusos roscados, à coluna de suporte em betão, através do aperto nas buchas, os quais definem três pontos e, consequentemente definem um plano. Aplicando o aperto ou o desaperto dos fusos, individualmente, consegue obter-se um plano horizontal.

Relativamente ao rectilismo, adaptaram-se diversos acessórios, solidários com a chapa, que possibilitam a translação transversal dos varões-guias lineares através do deslizamento guiado destes ao longo do sentido transversal.

Este movimento permite definir uma posição independentemente de cada varão das guias lineares, possibilitando ajustar o rectilismo destes ao longo dos 50 m.

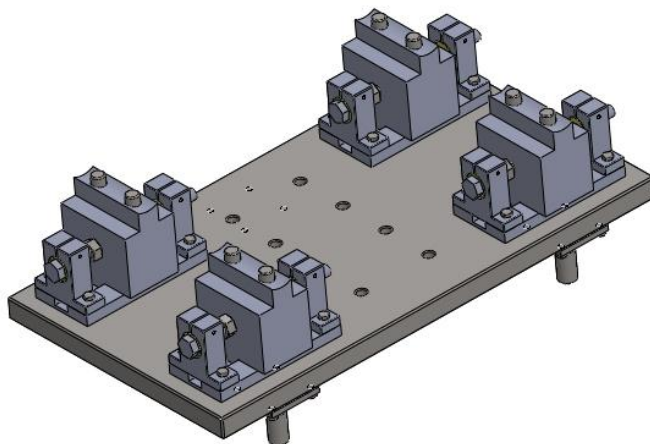


Figura 6.3: Mesa reguladora do rectilismo e da horizontalidade

Os materiais e acessórios que constituem a mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade são apresentados na figura 6.4.

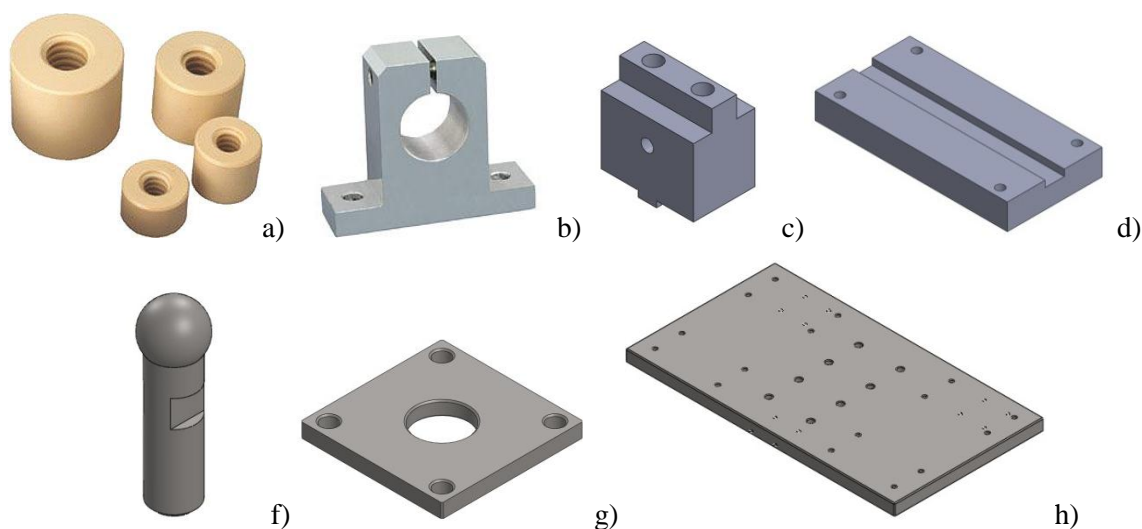


Figura 6. 4: Componentes integrantes da mesa reguladora do rectilismo e da horizontalidade

- | | | |
|--|---|--|
| a) Porca | b) Suporte da porca | c) Suporte dos varões das guias lineares |
| d) Suporte do deslizamento transversal | f) Fuso regulador do plano horizontal | |
| g) Placa para a rótula | h) Placa reguladora do plano horizontal | |

A mesa porta instrumentos de medição (Figura 6.5) é um componente projectado com a finalidade de suportar os instrumentos de medição a calibrar/verificar. Encontra-se solidária com a placa da mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade (Figura 6.3) permitindo assim obter o plano horizontal.

A horizontalidade é um factor importante neste componente, já que, se a mesa porta instrumentos de medição se encontrar inclinada, esta irá influenciar a leitura dos valores das marcas das medidas materializadas de comprimento.

Este componente foi simplificado geometricamente para ter uma aplicação que possa ser adaptada de acordo com os vários procedimentos técnicos de controlo metrológico existentes, como também futuros procedimentos técnicos a desenvolver.

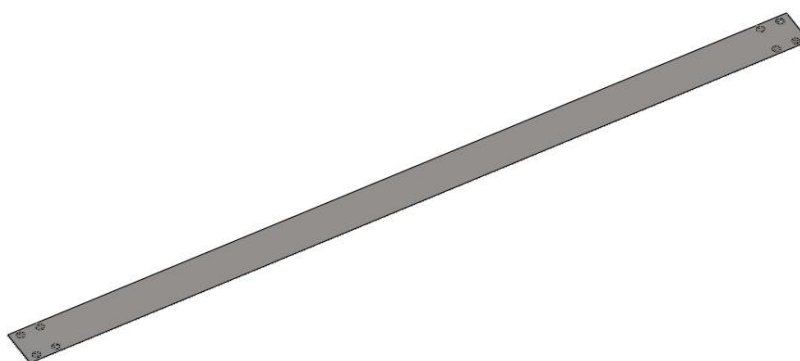


Figura 6. 5: Mesa porta instrumentos de medição

As guias lineares são os componentes que permitem suportar e dirigir o sistema de movimentação (carro) através do seu deslizamento ao longo de uma distância linear até 50 m.

Um estudo de mercado aprofundado, realizado sobre mesas de precisão, rolamentos, sistemas de guias lineares, permitiu encontrar diversas soluções de aplicação para se efectuar o suporte do deslizamento do sistema de movimentação. Dentro das hipóteses estudadas definiu-se que a solução mais adequada e também mais económica, era a aplicação de guias lineares de secção circular (varões cilíndricos) (Figura 6.6). Existem diversos fabricantes que fornecem os varões com diferentes tipos de materiais e diferentes acessórios a adaptar. No entanto na aplicação a ser desenvolvida optou-se pela utilização de guias lineares de secção circular *DryLin® R* do fabricante *Igus* devido às características do conjunto guias lineares e sistema de deslizamento, que não necessitam de manutenção.



Figura 6. 6: Varões dos Guias Lineares

O material dos varões escolhido para este caso específico é um aço inoxidável temperado, sendo o varão fornecido já com o tratamento realizado.

A mesa de suporte dos componentes ópticos (Figura 6.7) é um componente integrante do sistema de suporte/apoio, embora a sua aplicação no projecto seja caracterizada por suportar especificamente os componentes ópticos fixos do sistema laser interferométrico, que se descreverão nas secções subsequentes: sistema de movimentação e sistema óptico.

A solução construtiva deste componente foi realizada adaptando-a à coluna de suporte, tendo em consideração os fusos necessários à regulação de rectilismo e horizontalidade da mesa de suporte.

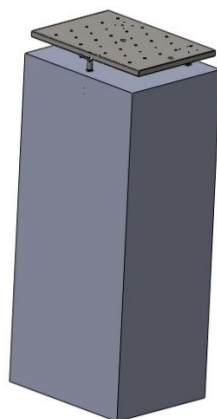


Figura 6. 7: Mesa de suporte dos componentes ópticos fixos

O sistema calha porta-cabos é constituído pela calha E 6.29 e a “Super Guia” em Alumínio.

Com a necessidade de dar automação ao equipamento de medição de longo foi necessário encontrar uma solução que permita realizar uma alimentação eficaz aos componentes que constituem o sistema de movimentação, o sistema de visualização/captação de imagem e o restante *hardware* do controlo programável do movimento.

Assim para que toda a cablagem seja devidamente guiada ao longo duma gama de medição até 50 m, definiu-se utilizar uma calha porta-cabos E 6.29 do fabricante *Igus* (Figura 6.8). Esta calha tem como principais características ser extremamente silenciosa, permitir velocidades e acelerações elevadas, com pequeno raio de curvatura e a sua utilização é adequada para salas limpas.

Devido ao facto do percurso a percorrer por parte do sistema de movimentação ser bastante longo, foi necessário adaptar um componente (“Super guia” em alumínio) (Figura 6.9) que faça o guiamento da própria calha E 6.29 ao longo dos 50 m.



Figura 6.8: Calha porta-cabos E 6.29



Figura 6.9: “Super guia” em alumínio

6.3.2.2 Sistema de Movimentação

O sistema de movimentação é constituído por um carro, automatizado, com controlo remoto, que se desloca em cima das guias lineares, numa gama de medição até 50 m. O carro é movimentado através de um motor *stepper*, que se encontra solidário ao carro, e que utiliza rodas de borracha para ultrapassar a força de atrito geradas entre as guias lineares e o carro.

A figura 6.10 apresenta uma imagem dos componentes que constituem o sistema de movimentação do equipamento de medição de longo alcance.

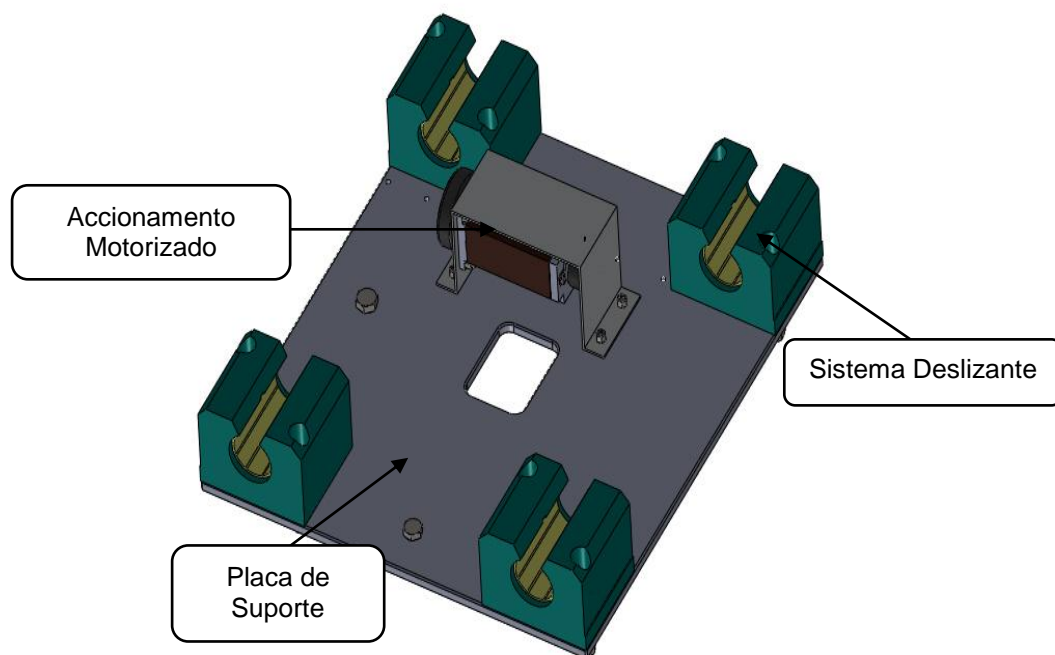


Figura 6. 10: Identificação e constituição do sistema de movimentação

O sistema de deslizamento, parte integrante do sistema de movimentação, é composto por diversos acessórios que permitem obter a capacidade de deslocação e suporte do carro motorizado. A solução construtiva deste sistema foi tomada em conjunto com a escolha das guias lineares do fabricante *Igus* [23]. Dentro dos produtos *DryLin® R* do fabricante *Igus*, existem diversas opções para a construção do sistema de deslizamento, sendo este constituído pelos acessórios, pelo elemento deslizante e pela chumaceira linear aberta.

Ao contrário das chumaceiras de rolamentos, que funcionam através da rotação das esferas entre o anel interno e o anel externo do rolamento (Figura 6.11), o elemento deslizante do fabricante *Igus* funciona através do seu deslizamento, permitindo uma maior superfície de contacto com os guias lineares, traduzindo-se em zonas de contacto sujeitas a menor pressão

(Figura 6.12), consequentemente, o sistema deslizante não necessita de manutenção e está completamente livre de gripagem para condições normais de funcionamento [23].

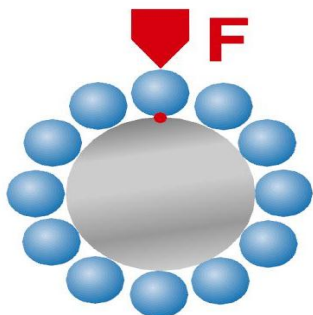


Figura 6. 11: Sistema esférico comum [23]

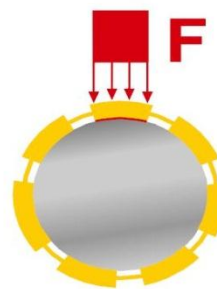


Figura 6. 12: Sistema deslizante *Drylin Igus* [23]

O sistema deslizante do fabricante *Igus* é constituído pela chumaceira linear aberta e pelo elemento deslizante (Figura 6.13). A chumaceira permite o alojamento do elemento deslizante através do seu encaixe, contendo ainda a particularidade de possibilitar a ligação aparafusada com a placa de suporte, uma vez que possui furos na sua base. O elemento deslizante é polímero maciço, que não necessita de lubrificação nem de manutenção. Para além disso, possui um baixo valor de coeficiente de atrito e tem excelentes propriedades de resistência ao desgaste [23].

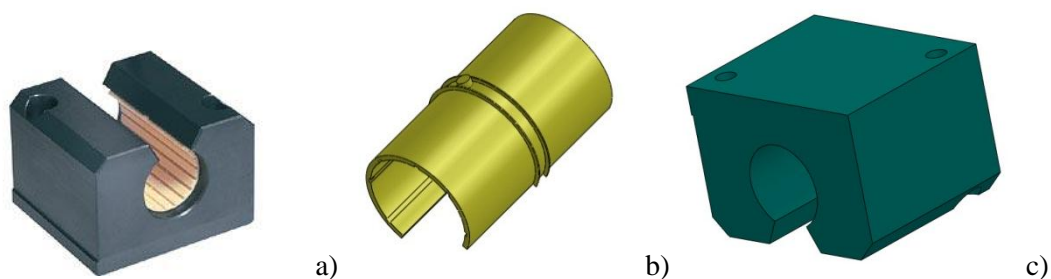


Figura 6. 13: Sistema de deslizamento

a)Conjunto de peças: elemento deslizante e chumaceira

b)Elemento deslizante

c)Chumaceira linear aberta

A placa de suporte do sistema de movimentação (Figura 6.10 e 6.14) foi pensada e projectada para ser usada como plataforma de suporte do sistema óptico e como elemento de ligação entre os componentes que compõem o sistema de movimentação. A placa de suporte possui um furo de secção rectangular na zona central, o qual permite a aquisição de imagem das marcas de escalas das medidas materializadas de comprimento através do sistema de visualização/captação de imagem. A geometria da placa de suporte foi também projectada tendo em consideração os restantes componentes a acoplar, tendo sido realizado um desenho de furos

que permita acondicionar todos os acessórios, de forma homogénea, necessários para obter a funcionalidade do sistema de movimentação, do sistema óptico e do sistema de visualização/captação de imagem.

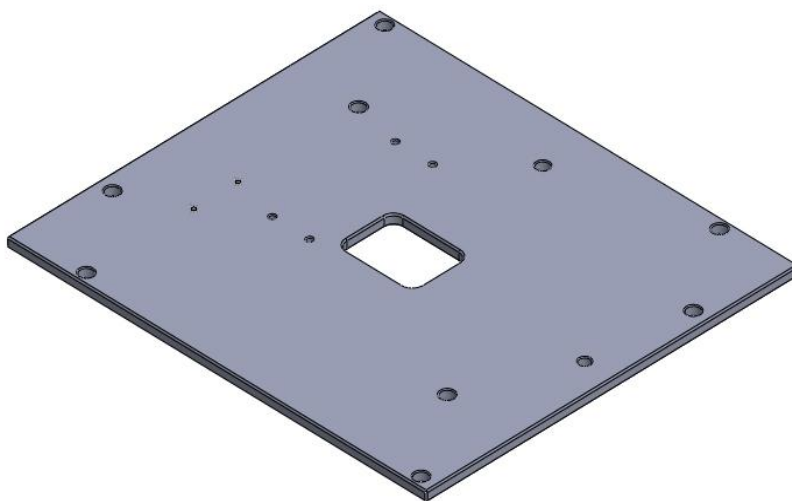


Figura 6. 14: Placa de suporte do sistema de movimentação

O accionamento motorizado da placa de suporte visa implementar no equipamento o movimento automatizado e foi pensado de forma a ter capacidade de se deslocar ao longo duma distância linear até 50 m. Além do accionamento do sistema de movimentação, era necessário ter em consideração outro dos principais requisitos de projecto, isto é, aproximação lenta e a paragem do sistema de movimentação no ponto da escala que se pretendia medir.

A escolha do motor é fundamental para responder às especificações de funcionamento exigidos, tendo recaído a escolha num motor *stepper Nema* [24] (Figura 6.15 c). Este motor tem como principais características ser um motor incremental (passo), com capacidade de variação de velocidade e com bipolaridade. O facto de ser incremental permite ao motor realizar um posicionamento muito preciso: a variação de velocidade é fundamental para executar a aproximação lenta e a paragem na marca de leitura da escala que se pretende medir. Para além do referido, a bipolaridade do motor possibilita a inversão do sentido de deslocamento do sistema de movimentação através da mudança da polaridade.

Finalmente o motor *stepper Nema* tem a possibilidade de estar acoplado a um codificador incremental (*encoder*) (Figura 6.15 d) que permite um posicionamento muito preciso do motor.

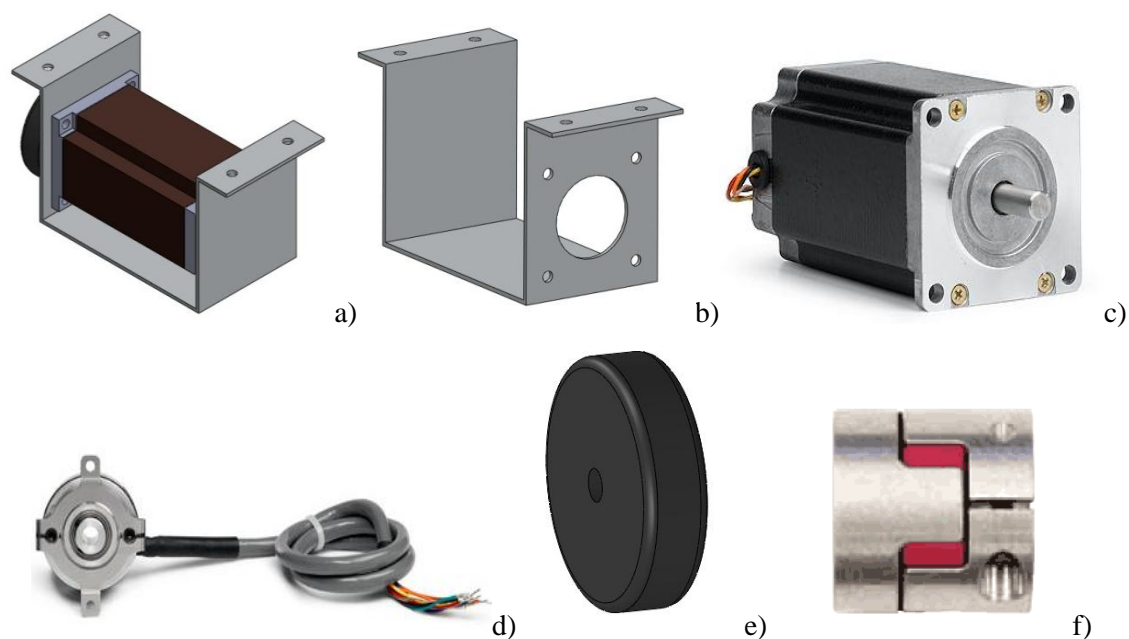


Figura 6. 15: Accionamento motorizado

- a)Conjunto b)Porta fixação do motor c)Motor *stepper* nema23 [24]
d)Codificador incremental [24] e)Roda de borracha f) Ligação Motor/roda

6.3.2.3 Sistema Óptico

O sistema óptico é constituído, entre outros componentes, por um sistema laser interferométrico (Figura 6.16) que, interagindo com o banco de ensaios possibilita obter capacidade de medição. Esta interacção, transforma o banco de ensaios num equipamento de medição de longo alcance, sendo fundamental quer no controlo da posição do carro quer na aquisição de dados.

O sistema laser interferométrico é também utilizado nesta tese como padrão de referência, sendo feita a comparação dos valores de indicados pelo interferómetro com os valores obtidos durante a aquisição de imagem das marcas das medidas materializadas de comprimento.

O sistema laser interferométrico a ser utilizado no banco de ensaios de 50 m é semelhante ao que foi usado no banco de ensaio *SIP* de 3 m da presente dissertação, com a designação *Hewlett-Packard (HP) 5528A*.

O desenvolvimento do projecto do equipamento de medição de longo alcance, foi sempre, realizado tendo em consideração a possibilidade da colocação dos diversos componentes ópticos que constituem o sistema laser interferométrico. Paralelamente foi previsto a colocação de outros instrumentos de medição utilizados no controlo metrológico, tais como, um sistema de aquisição de temperaturas e um barómetro. Estes instrumentos de medição são importantes no

que se refere ao controlo das condições ambientais, permitindo efectuar uma interface para a introdução de factores de correcção no sistema laser interferométrico na aquisição de dados em função dos valores ambientais de temperatura e pressão.



Figura 6. 16: Unidade laser do sistema laser interferométrico *HP 5528^a*

6.3.2.4 Sistema de Visualização/Captação de Imagem

O sistema de visualização/captação de imagem permite realizar a leitura das marcas de escala das medidas materializadas de comprimento, sendo constituído pelos componentes apresentados na figura 6.17.

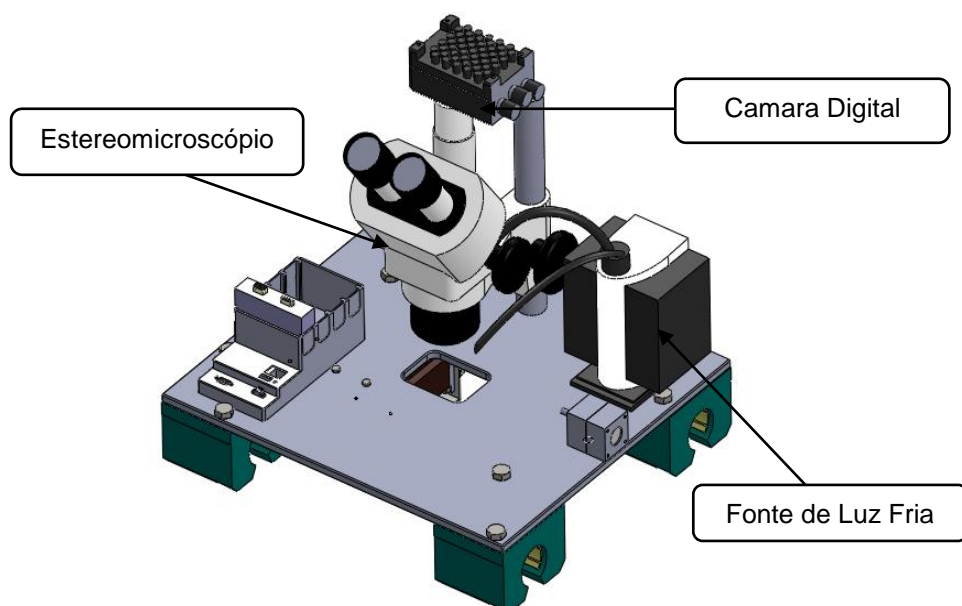


Figura 6. 17: Identificação e constituição do sistema de visualização/captação de imagem

De modo a adquirir melhores imagens optou-se pela utilização de um estereomicroscópio (Figura 6.18), que é um equipamento utilizado em metrologia devido às capacidades de visualização ampliada e tridimensional dos objectos sob observação. O estereomicroscópio a utilizar no sistema de visualização/captação de imagem foi escolhido de acordo com as opções já existentes no LCO: o estereomicroscópio *Stemi 2000* do fabricante *Carl Zeiss*.



Figura 6.18: Estereomicroscópio *Stemi 2000* da *Carl Zeiss*

A fonte de luz fria é um equipamento a ser aplicado no estereomicroscópio, desempenhando funções de iluminação das marcas de escalas dos instrumentos de medição sem afectar as condições ambientais. A escolha do equipamento teve em consideração um valor de massa reduzida e que cumprisse a função à qual se destina, sendo aconselhada a fonte de luz fria *Leica L2* (Figura 6.19).



Figura 6. 19: Fonte de luz fria *Leica L2*

A câmara digital escolhida para efectuar a aquisição de imagem foi a câmara *NI 1776 C Smart Camera*, com as características técnicas apresentadas na tabela 6.1.

Tabela 6. 1: Características da camara digital *NI 1776 C Smart Camera* [24]

Resolução	Processador	Memória	RAM	Taxa de aquisição	Tempo de obturação
1600×1200	1,6 GHz Intel Atom	2 GB	512 MB	10 <i>frames per second</i>	88 µs

A escolha da câmara digital *NI 1776 C Smart Camera* (Figura 6.20) foi realizada devido às suas características, principalmente pelo facto deste equipamento conter um processador, possibilitando a aquisição de imagem através da execução do código escrito em *software* instalado no próprio equipamento. O facto da câmara digital ter as características técnicas apresentadas na tabela 6.1, permite que não seja necessário adquirir mais *hardware* para a realização da aquisição de imagem.



Figura 6. 20: Câmara digital *NI 1776 C Smart Camera*

6.4 Dimensionamento e Projecto de Detalhe

O dimensionamento e o projecto de detalhe são realizados após a apresentação das soluções de projecto. Através da definição dos requisitos de projecto, organizaram-se conceitos e ideias que permitiram encontrar soluções tendo sido identificados materiais e acessórios.

Após a descrição das soluções de projecto procurou-se realizar o dimensionamento dos componentes que constituem o equipamento de medição de longo alcance, com explicações detalhadas, justificando a solução construtiva encontrada.

O dimensionamento do banco de ensaio de 50 m é efectuado a partir do sistema de movimentação, para que depois seja possível dimensionar o sistema de suporte/apoio. Esta opção é justificada pelo facto de ser necessário conhecer as características geométricas do carro, para contabilizar o carregamento ao qual o sistema de suporte/apoio vai ser solicitado.

A solução construtiva encontrada para o sistema de movimentação é aqui apresentada na presente secção através da identificação dos materiais e acessórios que estão solidários com o carro.

A tabela 6.2 apresenta as características geométricas e a massa dos acessórios, que são responsáveis pela carga aplicada na placa de suporte do carro.

Tabela 6. 2: Características geométricas e massa dos componentes solidários ao carro

	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Massa (kg)
Estereomicroscópio	340,0	180,0	346,0	2,654
<i>NI compactRIO chassis de 4 slots</i>	179,6	88,1	93,1	0,581
<i>NI 9512 C series stepper drive</i>	71,3	22,9	88,1	0,155
Fonte de luz fria Leica L2	125,0	110,0	150,0	0,530
Cubo retroreflector móvel	40,0	25,0	40,0	0,224
			Total	4,144

6.4.1 Placa de Suporte

A placa de suporte foi dimensionada com uma configuração capaz de suportar todos os acessórios a acoplar. Considerou-se uma placa com as seguintes dimensões: 450×400×10 mm, sendo esta fabricada numa liga de alumínio da série 5000.

A tabela 6.3 apresenta as características da liga de alumínio 5052.

Tabela 6. 3: características da liga de alumínio 5052

Massa Volúmica ρ (kg/m ³)	Módulo de Elasticidade Longitudinal GPa	Tensão de cedência MPa
2680	70,3	215

Devido à necessidade de incluir vários furos na placa de suporte, decidiu-se realizar a análise de tensões e de deformação através do *software Solidworks Simulation*.

Considerando a massa total dos acessórios apresentados na tabela 6.2 e a massa do motor, *Nema 23* (1,5 kg), a placa terá de suportar 5,644 kg. Podendo existir necessidade de acoplar outros componentes ópticos, ou adaptar outras *slot's* no controlador, definiu-se que a força total constante e uniformemente distribuída em toda a área da placa a que a placa de suporte pode estar sujeita será de 100 N. Concomitantemente, a placa está apoiada em duas arestas opostas correspondendo à posição das guias lineares de suporte.

As figuras 6.21 e 6.22 mostram as distribuições da tensão equivalentes de *Von Mises* e da deformação, respectivamente, obtidos na simulação numérica da placa considerada no estudo.

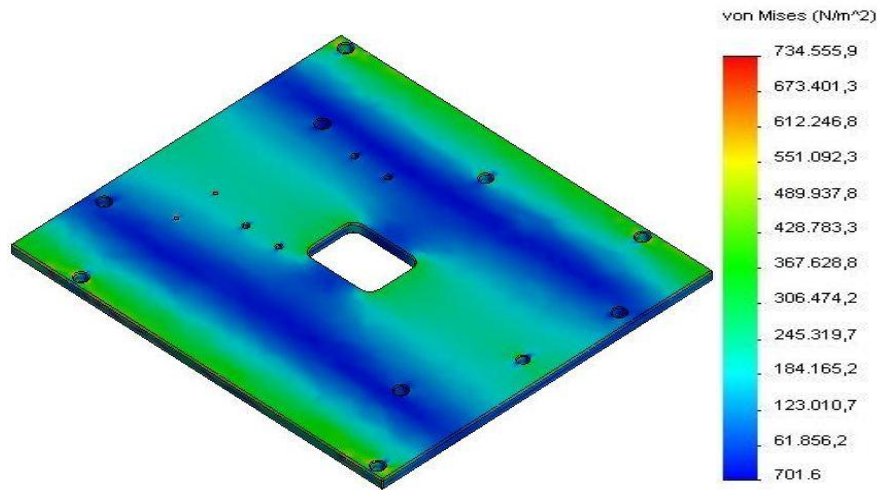


Figura 6. 21: Distribuição da tensão equivalente de *Von Mises* na placa de suporte

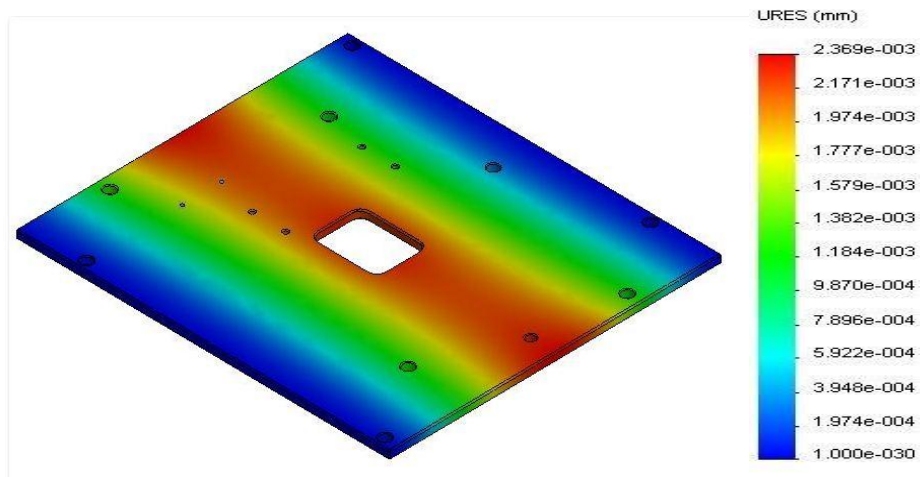


Figura 6. 22: Distribuição da deformação na placa de suporte

Os resultados calculados permitem inferir que os níveis de tensão e de deformação induzidos na placa são muito pequenos, quando comparados com a tensão e a deformação admissível do material. De qualquer forma, as dimensões estabelecidas são aquelas que melhor se adaptam às funcionalidades da placa de suporte.

6.4.2 Guias Lineares

O dimensionamento das guias lineares é realizado de acordo com o constrangimento de projecto, que limita a flecha máxima dos varões a valores inferiores a 1 mm.

A partir da equação diferencial da curva elástica de vigas (equação 6.1 [25]) é possível determinar a flecha máxima a que o varão está sujeito.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (6.1)$$

Onde $M(x)$ é o momento flector, E é o módulo de elasticidade longitudinal e I representa o momento de inércia da secção resistente à flexão.

As guias lineares podem considerar-se vigas simplesmente apoiadas (Figura 6.23). Tendo em consideração o funcionamento do sistema de movimentação, o valor de flecha máximo é obtido quando com duas forças concentradas são aplicadas à mesma distância dos apoios, como se apresenta na figura 6.23.

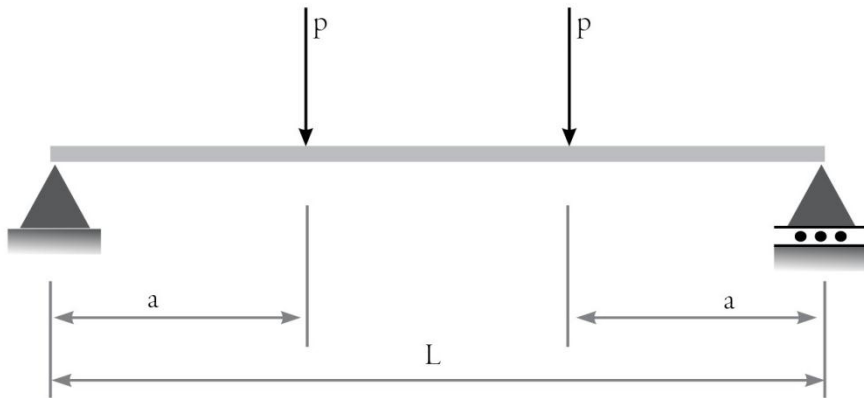


Figura 6. 23: Varão simplesmente apoiado submetido a duas cargas concentradas (simplificação)

O varão apresentado na figura 6.23 pode ser decomposto em duas condições mais simples, figura 6.24.

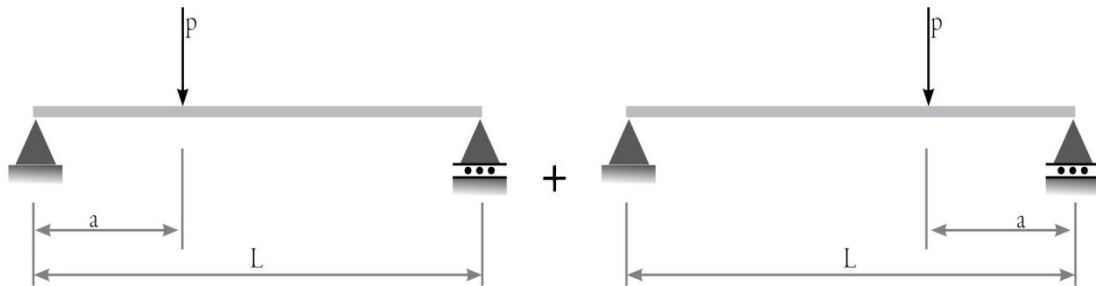


Figura 6. 24: Método da sobreposição

A equação diferencial da curva elástica da viga representada na figura 6.24 é apresentada através da equação 6.2a para $0 \leq x \leq (l - a)$ e pela equação 6.2b para $(l - a) \leq x \leq l$.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Pa}{l} x \right) \quad 0 \leq x \leq (l - a) \quad (6.2a)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Pa}{l}x + P(x - (L - a)) \right) \quad (l - a) \leq x \leq l \quad (6.2b)$$

Realizando o primeiro integral para a equação 6.2a e equação 6.2b obtém-se o deslocamento angular, apresentado pela equação 6.3a e equação 6.3b.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Pax^2}{2l} + C_1 \right) \quad 0 \leq x \leq (l - a) \quad (6.3a)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Pax^2}{2l} + \frac{P(x-(L-a))^2}{2} + C_1 \right) \quad (l - a) \leq x \leq l \quad (6.3b)$$

Determinando o segundo integral da equação 6.2a e 6.2b obtém-se a flecha através da equação 6.4a e 6.4b.

$$y = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Pax^3}{6l} + C_1x + C_3 \right) \quad 0 \leq x \leq (l - a) \quad (6.4a)$$

$$y = \frac{1}{EI} \left(-\frac{Pax^3}{6l} + \frac{P(x-(L-a))^3}{6} + C_2x + C_4 \right) \quad (l - a) \leq x \leq l \quad (6.4b)$$

Podendo considerar $C_1 = C_2$ e $C_3 = C_4$, devido ao facto da flecha ter o mesmo valor quando $x = a$ para ambas as equações.

Desta forma, calcula-se as constantes aplicando as condições de fronteira e substituindo na equação 6.4:

Para $[x = 0, y = 0]$ a constante tem o valor $C_3 = C_4 = 0$.

Aplicando as condições de fronteira na equação 6.4b temos:

Para $[x = l, y = 0]$ a constante tem o valor $C_1 = C_2 = \frac{Pa(l^2 - a^2)}{6l}$.

Substituindo as constantes nas equações 6.4a e 6.4b encontram-se as equações elásticas 6.5a e 6.5b.

$$y = \frac{1}{EI} \frac{Pax}{6l} (l^2 - a^2 - x^2) \quad 0 \leq x \leq (l - a) \quad (6.5a)$$

$$y = \frac{1}{EI} \left(\frac{Pax}{6l} (l^2 - a^2 - x^2) + \frac{P(x-(L-a))^3}{6} \right) \quad (l - a) \leq x \leq l \quad (6.5b)$$

Neste caso particular podemos referir que a flecha é máxima numa zona próxima da secção central podendo assim obter-se aproximadamente a flecha máxima no ponto $x = l/2$ sendo este ponto aplicada na equação 6.5a [25].

$$y = \frac{Pa}{48EI} (3l^2 - 4a^2) \quad (l - a) > a \quad (6.6)$$

Nas guias lineares temos duas cargas iguais e aplicadas à mesma distância dos apoios. Dessa forma é possível considerar que a flecha em cada ponto provocada por cada uma das cargas é igual. Sendo assim podemos calcular a flecha máxima a partir da equação 6.6 através da soma das duas cargas.

É necessário lembrar que as guias lineares são constituídas por dois varões o que faz com que cada um deles suporte metade da soma das duas cargas. Assim a flecha máxima nas guias lineares é metade, ou neste caso específico o momento de inercia é o dobro daquela que vai ser apresentada na tabela 6.4.

Considerando toda a carga associada ao sistema de movimentação, carga máxima que a placa de suporte admite é de 100 N, mais a carga da própria placa que é aproximadamente de 50 N, fica a faltar definir a carga do sistema deslizante.

Definido o comprimento de cada varão dos guias lineares determina-se a partir da equação 6.6 o momento de inercia.

Tabela 6. 4: Resultados da equação da elástica para calcular o momento de inercia

Flecha máxima y (m)	Carga do sistema de movimentação P (N)	Comprimento do varão l (m)	Módulo da elasticidade E (GPa)	Distância do ponto de aplicação da carga a (m)	Momento de inercia I (m⁴)
0,001	150	2	200	0,8205	$1,19 \times 10^{-7}$

Podemos então constatar que o momento de inercia para cada um dos varões é de $I = 2 \times 1,19 \times 10^{-7} \text{ m}^4$.

O momento de inércia é dado pela equação 6.7, e a partir da qual é possível obter o raio mínimo para os varões dos guias lineares.

$$I = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{2} \right)^4 \quad (6.7)$$

O diâmetro mínimo a ser considerado para que flecha máxima não seja superior a 1 mm é de $d > 19,7$ mm.

Dentro das opções oferecidas pelo fabricante existe varões com diâmetros de 25, 30, 40 e 50 mm. A primeira escolha foi realizada para um varão de diâmetro de 30 mm, já que a carga ao qual os varões estão sujeitos vai aumentar.

Desta forma verificou-se qual a flecha da qual o varão vai estar sujeito, para o novo momento de inercia. Neste cálculo vai ser também contabilizado um novo carregamento (190 N), já que definido o diâmetro dos varões de guiamento é possível contabilizar a massa do sistema deslizante (Chumaceiras lineares abertas).

Tabela 6. 5: Resultado da equação da elástica para a flecha do varão $\varnothing = 30$ mm

Momento de inercia I (m⁴)	Carga do sistema de movimentação P (N)	Comprimento do varão l (m)	Módulo da elasticidade E (GPa)	Distância do ponto de aplicação da carga a (m)	Flecha máxima y (m)
$3,98 \times 10^{-8}$	190	2	200	0,8205	$3,78 \times 10^{-3}$

Sabendo que as guias lineares são constituídas por dois varões a flecha para o caso apresentado na tabela 6.5 é metade do valor apresentado $y = 1,89 \times 10^{-3}$ m.

Assim a opção para os varões mais correcta é com o diâmetro de 40 mm.

Contabilizando um novo carregamento (210 N), já que a massa do sistema deslizante para este caso é superior, apresenta-se na tabela 6.6 a flecha máxima.

Tabela 6. 6: Resultado da equação da elástica para a flecha do varão $\varnothing = 40$ mm

Momento de inercia $I \text{ (m}^4\text{)}$	Carga do sistema de movimentação $P \text{ (N)}$	Comprimento do varão $l \text{ (m)}$	Módulo da elasticidade $E \text{ (GPa)}$	Distância do ponto de aplicação da carga $a \text{ (m)}$	Flecha máxima $y \text{ (m)}$
$1,26 \times 10^{-7}$	210	2	200	0,8205	$1,33 \times 10^{-3}$

Sabendo que a flecha é metade do valor referido na tabela 6.6 obteve-se, para um varão com o diâmetro de 40 mm, uma flecha máxima de $y=0,67$ mm.

6.4.3 Sistema de deslizamento

O sistema de deslizamento é composto pelo elemento deslizante e a chumaceira linear aberta. A escolha destes acessórios é efectuada em conjunto com a escolha dos varões das guias lineares.

Como foi apresentado anteriormente, os varões do banco de ensaios terão de ter um diâmetro de $\varnothing = 40$ mm. Logo, o elemento deslizante terá também de ter um diâmetro interior de $\varnothing = 40$ mm. O coeficiente de atrito associado ao elemento deslizante *iglidur® J* está compreendido entre 0,06-0,18 [23].

A escolha da chumaceira é efectuada em conjunto com o elemento deslizante, embora a chumaceira tenha de ser analisada quanto à capacidade de carga que consegue suportar. Os materiais usados nos produtos *DryLin® R* do fabricante *Igus*, que possibilitam o deslizamento do carro e têm as características apresentadas na tabela 6.7. Como se verifica pela análise da tabela os valores de força aplicados sobre as chumaceiras utilizadas na tese são inferiores aos recomendados na tabela 6.7.

Tabela 6. 7: Características da chumaceira alinear aberta [23]

Tolerância do diâmetro interno do casquilho (mm)	Carga dinâmica máxima P (N)	Carga estática máxima P (N)	Massa m (kg)
0,040-0,115	8000	56000	1,485

6.4.4 Sistema Calha Porta-cabos

Este sistema foi escolhido devido às suas características, mencionadas no ponto 6.3.2.1, e tem ainda a particularidade da calha E 6.29 ser fixa no centro do percurso dos 50 m, realizando o seu deslocamento nos dois sentidos (25 m para cada lado). Esta particularidade faz com que a calha tenha dimensões aproximadamente metade do percurso a percorrer.

A tabela 6.8 caracteriza as dimensões da calha E 6.29.

Tabela 6. 8: Dimensões da calha E 6.29

Largura Interior B_i (mm)	Raio da Curvatura R (mm)	Comprimento da Calha (mm)	Largura Exterior B_a (mm)	Altura Interior (mm)	Altura Exterior (mm)
30	100	25360	46	28	35

6.4.5 Accionamento Motorizado

O motor foi escolhido de acordo com os objectivos referidos anteriormente (passo incremental, bipolaridade) sendo necessário verificar outras características que o motor tem de conter, tais como: binário, bipolaridade, passo, dimensões, e massa.

Relativamente ao binário o motor tem de ser capaz de ultrapassar a força de atrito existente entre o elemento deslizante e os varões das guias lineares, e também da calha E 6.29 e a barra deslizante da “Super guia” em alumínio.

A força de atrito é dada pela equação 6.8.

$$F_a = \mu_1 \times F_{N1} + \mu_2 \times F_{N2} \quad (6.8)$$

Onde μ_1 é o coeficiente de atrito estático entre o elemento deslizante polimérico e o varão-guia metálico, μ_2 é o coeficiente de atrito entre a calha E 6.29 e a barra deslizante. A F_{N1} é a força normal de todo o sistema de movimentação, e F_{N2} é a força normal da calha E 6.29.

O binário mínimo, B , para que o motor tenha capacidade de deslocar o sistema de movimentação ao longo do banco é dado pela equação 6.9.

$$B = F_a \times r \quad (6.9)$$

Onde r é o raio da roda de accionamento que vai estar solidária ao veio do motor. O raio da roda é calculado através do passo mínimo pretendido para o sistema (1 mm de avanço por cada incremento angular do motor). Como no caso do tipo de motor escolhido o incremento mínimo é de $1,8^\circ$, através da equação 6.10 obtém-se uma relação trigonométrica que possibilita calcular o valor do raio da roda necessário.

$$\tan \alpha = \frac{a}{r} \quad (6.10)$$

A tabela 6.9 apresenta os resultados para o dimensionamento da roda.

Tabela 6. 9: dimensionamento da roda para o accionamento do carro

Incremento mínimo do motor α (°)	Avanço mínimo a (mm)	Raio da roda de borracha r (mm)
1,8	1	31,8

O diâmetro necessário para que a roda cumpra um avanço de $a=1$ mm para cada incremento mínimo do motor é $\varnothing = 63,6$ mm. Pelo facto de não existirem rodas com as características acima descritas, aconselha-se a aquisição de uma roda de diâmetro $\varnothing = 65$ mm. Dessa forma o avanço mínimo que o carro se irá deslocar para um incremento mínimo do motor será de 1,02 mm.

Tendo em consideração a dimensão calculada da roda a tabela 6.10 contém os resultados e os valores usados no cálculo do binário mínimo do motor (equação 6.8 e equação 6.9).

Tabela 6. 10: Resultados do dimensionamento do motor

Força normal F_{N1} (N)	Força normal F_{N2} (N)	Coefficiente de atrito μ_1	Coefficiente de atrito μ_2	Força de atrito F_a (N)	Raio da roda de borracha r (m)	Binário mínimo do motor B (N.m)
210	182,5	0,18	0,19	72,5	$32,5 \times 10^{-3}$	2,36

Dentro do motor *stepper Nema 23* a opção escolhida foi o modelo ref. *NI 780084-01* com um binário máximo de $B=2,68$ N.m [24].

A tabela 6.11 apresenta as características técnicas do motor *stepper Nema 23*.

Tabela 6. 11: Características técnicas do motor *stepper Nema 23* [24]

Binário Máximo B (N.m)	Velocidade Máxima v (r.p.m)	Incremento (°)	Incrementos por 1 Rotação
2,68	3000	1,8	200

6.4.6 Mesa Porta Instrumentos de Medição

A mesa porta instrumentos de medição é um componente que tem de ser dimensionado tendo em atenção a flecha máxima induzida pela carga aplicada pelos instrumentos de medição e acessórios de fixação. Com efeito a flecha a que a mesa porta instrumentos de medição vai estar sujeita pode influenciar a leitura da escala das medidas materializadas de comprimento (fitas métricas ou sondas), que são colocadas sobre o banco de ensaios ao longo da sua gama de medição e influenciar a incerteza de medição.

Considerou-se que a mesa vai estar sujeita a uma carga máxima no ponto onde vão ser aplicados os acessórios de fixação (Figura 6.25). Considerando, de uma forma simplificada, que a mesa porta instrumentos de medição pode ser representada por uma viga simplesmente apoiada, com aplicação de uma carga concentrada, apresentada na figura 6.25, o cálculo da flecha máxima pode ser realizada.

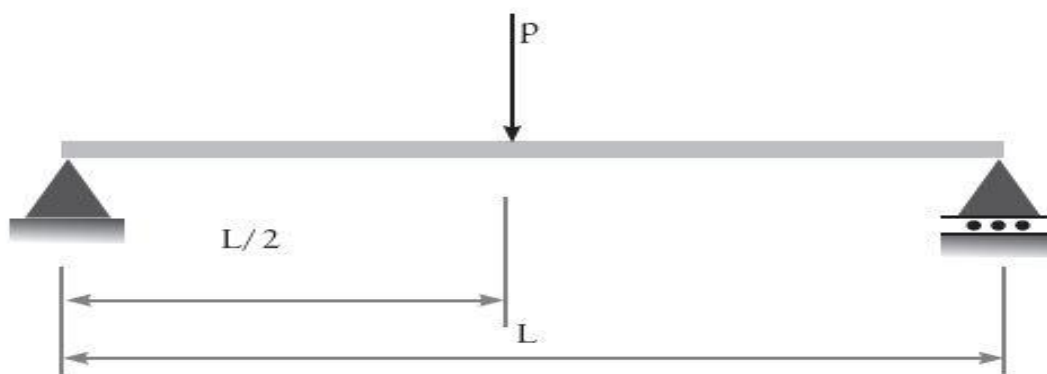


Figura 6. 25: Viga simplesmente apoiada submetida a uma carga concentrada

Aplicando a equação diferencial da curva elástica da viga, apresentada na equação 6.1, para a viga da figura 6.25, onde o momento flector é apresentado pela equação 6.11

$$M(x) = \frac{Px}{2} \quad (6.11)$$

e integrando a equação 6.11 duas vezes obtém-se a equação da curva elástica onde a flecha é máxima quando $x = l/2$ apresentada na equação 6.12.

$$y = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (6.12)$$

Definindo a flecha máxima igual ao estabelecido para o rectilismo, o comprimento e o momento de inércia calcula-se a força máxima que a mesa porta instrumentos de medição pode suportar, apresentado na tabela 6.12.

Tabela 6. 12: Resultado da força máxima que mesa porta instrumentos de medição pode suportar

Flecha máxima y (m)	Comprimento da mesa l (m)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Momento de inercia (m⁴)	Força máxima P (N)
1×10^{-3}	2	200	$6,67 \times 10^{-8}$	80

A mesa porta instrumentos de medição tem capacidade de suportar uma força de 80N, permitindo assim adaptar diversos acessórios de fixação e também o próprio instrumento de medição a calibrar.

6.4.7 Mesa Reguladora do Rectilismo e Horizontalidade

A mesa reguladora da rectitude e horizontalidade é um dos componentes fundamentais em todo o projecto, sendo necessário fazer o seu dimensionamento tendo em atenção diversas características.

O dimensionamento da mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade (Anexo F desenho 01.0014.12) foi realizado tendo em atenção a deformação máxima a que a mesa vai estar sujeita, a tensão de cedência, a forma como vai estar apoiada, as dimensões da área de superfície.

A mesa reguladora da rectitude e horizontalidade tem o comportamento de uma placa rectangular com três apoios e aplicada sobre ela uma carga distribuída. O cálculo da deformação máxima e tensão de cedência do componente foi avaliado através análise no *Solidworks Simulation*.

A figura 6.26 e 6.27 exhibe os resultados obtidos na simulação da tensão e da deformação.

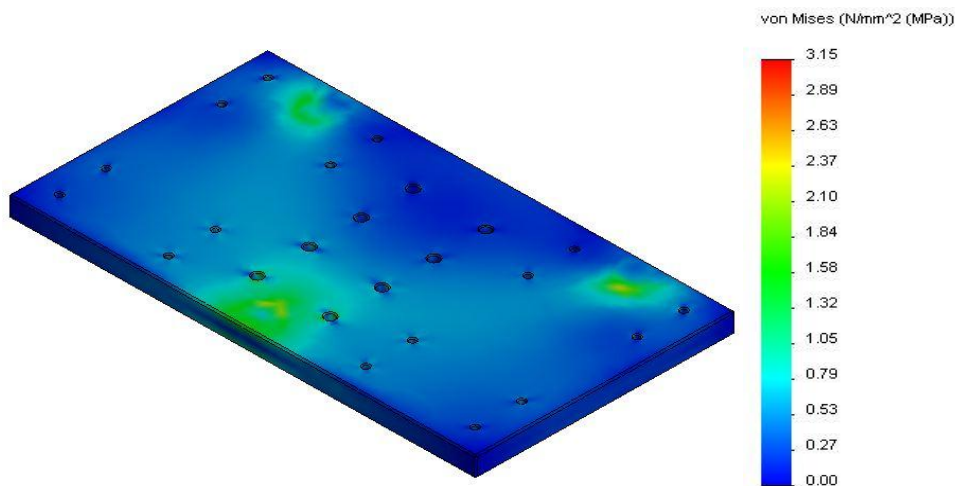


Figura 6. 26: Distribuição da tensão equivalente de *Von Mises* da mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade

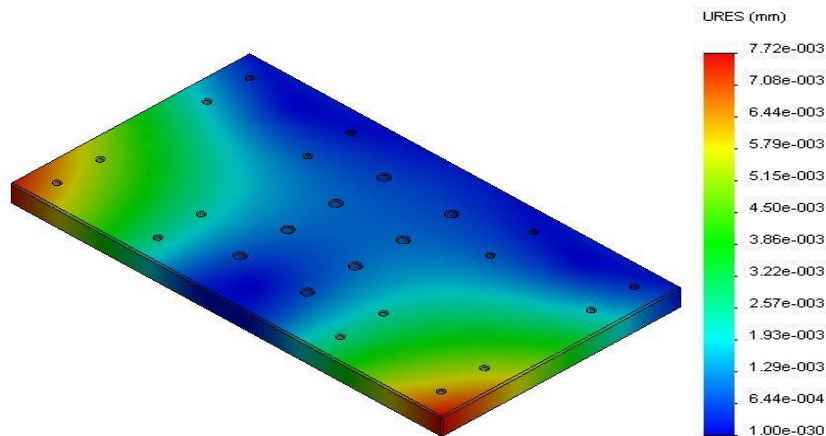


Figura 6. 27: Distribuição da deformação da placa da mesa reguladora do rectilismo e horizontalidade

Neste ponto é também importante realizar o dimensionamento dos fusos que fazem o acoplamento da mesa com a coluna de suporte, de modo a evitar as cargas de instabilidade estrutural.

O dimensionamento é realizado a partir da carga crítica, relacionando a altura dos fusos com o momento de inércia. Aplicando a fórmula de Euler para as condições de encastramento do fuso, que utiliza o comprimento do fuso igual ao dobro do comprimento real. Aplicando a equação 6.13 permite determinar a carga crítica da encurvadura [26].

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4l^2} \quad (6.13)$$

A tabela 6.13 apresenta o resultado da carga critica aplicando a equação 6.13.

Tabela 6. 13: Resultados da carga crítica da encurvadura dos fusos reguladores da horizontalidade

Módulo de Young E (GPa)	Momento de inércia I (m⁴)	Comprimento do fuso l (m)	Carga crítica P_{cr} (N)
200	$3,22 \times 10^{-9}$	0,115	$1,20 \times 10^5$

A carga que está aplicada nos fusos reguladores da horizontalidade é de 625 N, que é inferior à carga crítica da encurvadura $1,20 \times 10^5$ N (tabela 6.13).

6.4.8 Coluna de Suporte

As colunas de suporte foram dimensionadas com o objectivo de dar altura ao banco de ensaios, para que todo o equipamento esteja proporcional à altura dos técnicos que nele trabalhem, com especial atenção à posição do estereomicroscópio, para que se encontre a uma altura em que os técnicos possam visualizar através do sistema óptico numa posição confortável.

Outro aspecto tido em consideração no dimensionamento das colunas de suporte foi a sua secção, que foi pensada de forma a que a mesa de regulação do rectilismo e horizontalidade possa ser acoplada na coluna através de três fusos podendo estes serem regulados em direcção ao interior da coluna ou o inverso.

Não existe necessidade realizar qualquer tipo de análise de encurvadura para as colunas já que estas tem um momento de inércia muito elevado. A tabela 6.14 apresenta as dimensões das colunas de suporte.

Tabela 6. 14: dimensões das colunas de suporte

Comprimento <i>l</i> (m)	Largura <i>b</i> (m)	Altura <i>h</i> (m)
0,5	0,3	1

6.5 Controladores Programáveis para Automação e Controlo de Instrumentos

Uma das principais especificações de projecto foi a necessidade de atribuir capacidade de automação ao equipamento de medição de longo alcance.

Para além da necessidade de permitir ao carro do sistema de movimentação deslocar-se através de accionamento motorizado controlado por controlo remoto, foi também necessário prever a aquisição de dados do sistema laser interferométrico e a aquisição de imagem à câmara digital.

Para conseguir realizar a automação do projecto decidiu-se utilizar o *software LabVIEW* da *National Instruments* para realizar o controlo, aquisição de dados e aquisição de imagem. O *LabVIEW* é uma linguagem de programação gráfica desenvolvida para aplicações em sistemas de medição e controlo.

Seguidamente são apresentadas as plataformas do *software LabVIEW* e *hardware* necessárias para realizar a automação entre motor, sistema laser interferométrico e câmara digital.

6.5.1 Plataformas do *Software LabVIEW* e *Hardware*

Assim apresenta-se o *hardware* e as plataformas de *software* do *LabVIEW* a ser adquirido para o sistema de movimentação, sistema de visualização e sistema óptico.

No sistema de movimentação, o *software* e *hardware* necessários para realizar o controlo do motor será seguinte:

- Controlador *NI cRIO-9076* (Figura 6.28);
- *Drive NI 9512 C Series* (Figura 6.29);
- *LabVIEW Real-Time*;
- *LabVIEW FPGA Module*;
- *LabVIEW SoftMotion*;

O controlador *NI cRIO-9076* é um sistema integrado que combina um controlo em tempo real, registo de dados e análise, com um Chassi *FPGA* reconfigurável para temporização personalizada, controlo e processamento [24].

O controlador permite ainda fazer a transferência de dados relativamente ao controlo do motor, a aquisição de imagem com o computador que realiza a aquisição de dados do interferómetro, com o objectivo de realizar a automação do equipamento. Esta transferência de dados deverá ser realizada através de rede sem fios.

A *drive NI 9512 C Series* executa uma interface com codificador incremental permitindo produzir um movimento com um controle preciso [24].

A plataforma *LabVIEW Real-Time* permite executar de forma confiável os sistemas autónomos em tempo real.

A plataforma *LabVIEW FPGA Module* ajuda a configurar a programação no *hardware* sem a complexidade dos *VHDL*.

A plataforma *LabVIEW SoftMotion* permite desenvolver aplicações de controlo em movimentos personalizados do motor.



Figura 6. 28: Controlador *NI cRIO-9076*



Figura 6. 29: *Drive NI 9512 C Series*

No sistema de visualização o *software* e *hardware* necessário para realizar a aquisição de imagem é o seguinte:

- Câmara digital *NI 1776C Smart Camera* (Figura 6.20);
- *LabVIEW NI Vision*;

A câmara digital apresentada anteriormente na figura 6.20 e na tabela 6.1, é um equipamento de alto desempenho de aquisição de imagem, capaz de operar em tempo real. A câmara digital *NI 1776C Smart Camera* tem integrado um processador que permite executar a programação através da plataforma *LabVIEW NI Vision* desenvolvendo aplicações de forma inteligente [24].

A plataforma *LabVIEW NI Vision* permite desenvolver e implementar aplicações na aquisição e processamento de imagens. Esta plataforma tem incorporado nela as plataformas *LabVIEW Real-Time* e *LabVIEW FPGA Module*.

No sistema óptico o *hardware* necessário para a aquisição de dados é o seguinte:

- Cabo *NI GPIB-USB-HS* (Figura 6.30);

O *NI GPIB-USB-HS* é um cabo que permite executar a transferência de dados em alta velocidade, capaz de um desempenho superior a 1,8 MB/s.



Figura 6. 30: Cabo *NI GPIB-USB-HS*

6.5.2 Método de Desenvolvimento do *Software*

Na presente secção pretende-se definir o algoritmo de programação necessário à implementação do sistema de medição de longo alcance.

6.5.2.1 Definição do Problema

Pretende-se que no equipamento de medição de longo alcance tenha capacidade de realizar a movimentação do carro através do seu deslocamento até um valor nominal. O deslocamento do carro deverá ser realizado através de duas velocidades distintas, uma, para iniciar a marcha até um valor intermédio do valor nominal e de seguida alterar a velocidade da marcha para realizar uma aproximação lenta ao valor nominal definido.

Quando o carro se encontrar no valor nominal pretendido, este deverá parar, para que o restante equipamento efectue a aquisição de dados do sistema laser interferométrico e também a aquisição de imagem por parte da câmara digital.

Após feita a aquisição de dados e à aquisição de imagem, o carro deverá continuar a marcha para outro valor nominal, ou, se for o caso, deslocar-se para o ponto de partida, caso não exista intenção de adquirir um novo valor nominal.

Seguidamente identificam-se os factores que influenciam o problema:

- Valor nominal;
- Velocidade do motor;
- Polaridade do motor;
- Aquisição de dados do sistema laser interferométrico;
- Aquisição de imagem;

6.5.2.2 Solução do problema

Nesta etapa pretende-se encontrar uma solução do problema através da identificação dos *inputs*, *outputs* e factores adicionais.

Seguidamente apresenta-se os *inputs* da solução do problema:

- Gama de medição;
- Valor nominal a iniciar os ensaios;
- Passo do deslocamento;
- Número de *run*;
- Tipo de *run*;

Os *outputs* da solução do problema são apresentados em seguida:

- Ligar o motor;

- Desligar o motor;
- Aquisição de dados;
- Aquisição de imagem;

Por fim apresentam-se os factores adicionais:

- Velocidade do *Motion 1* (velocidade de cruzeiro com valor nominal crescente “*run up*”) e *Motion 3* (velocidade de cruzeiro com valor nominal decrescente “*run down*”);
- Velocidade do *Motion 2* (velocidade de aproximação com valor nominal crescente “*run up*”) e *Motion 4* (velocidade de aproximação com valor nominal decrescente “*run down*”);
- Velocidade do *Motion 0* (velocidade de cruzeiro de retorno ao valor nominal inicial do equipamento);

Após a apresentação dos *inputs*, *outputs* e dos factores adicionais pretende-se criar um algoritmo que descreva a sequência de operações que o equipamento de medição de longo alcance tem de realizar.

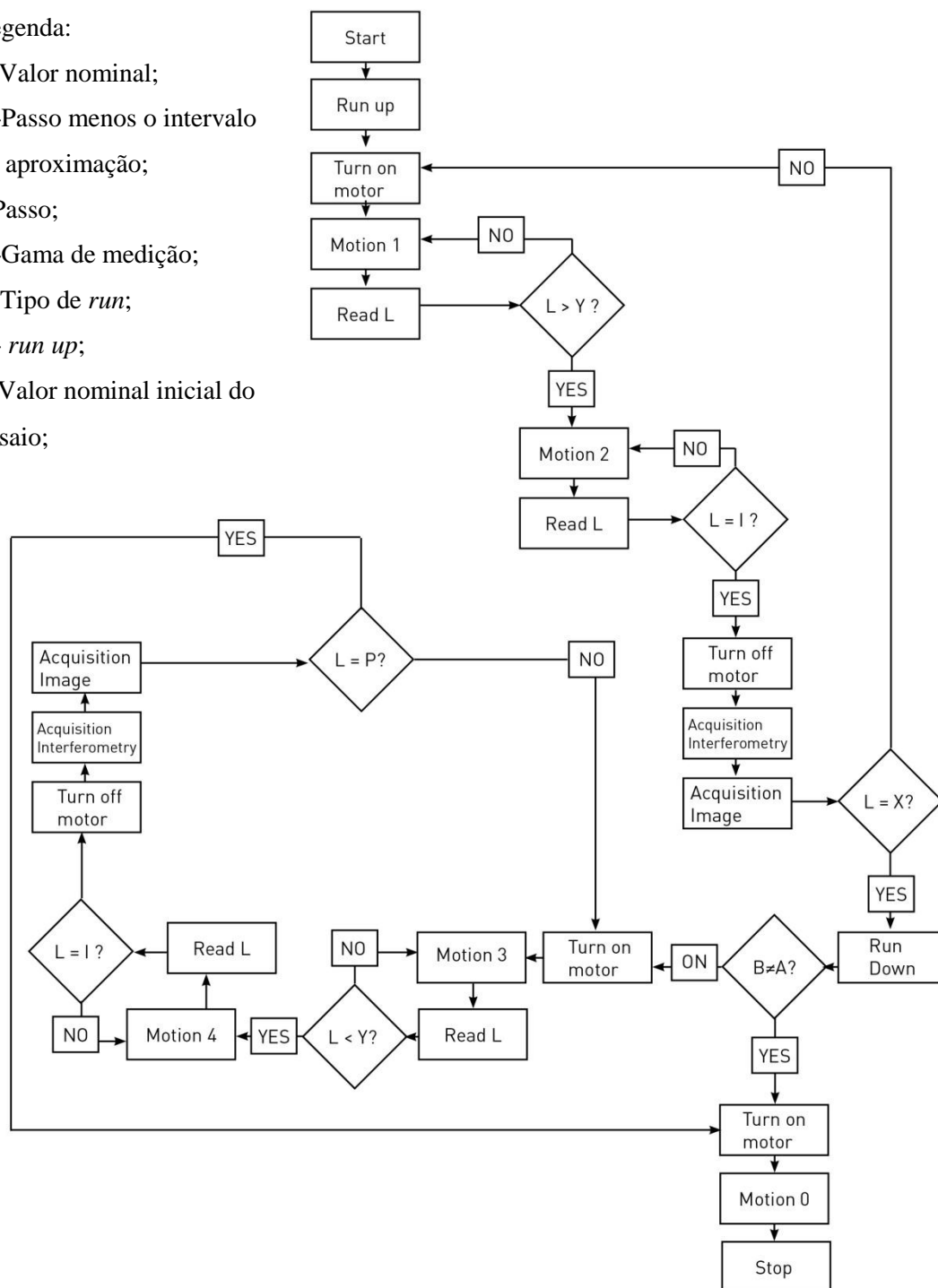
Seguidamente apresenta-se o algoritmo com a sequência funcional da solução do problema:

1. Definir o sentido de percurso que o motor vai fazer “*run up*”;
2. Ligar o motor;
3. Executar o deslocamento “*Motion 1*”;
4. Realizar a leitura do valor nominal;
5. Se o valor nominal não for maior que passo do deslocamento menos o intervalo de aproximação, voltar ao ponto 3;
6. Executar o deslocamento “*Motion 2*”;
7. Realizar a leitura do valor nominal;
8. Se o valor nominal não for igual ao passo, voltar ao ponto 6;
9. Desligar o motor;
10. Realizar a aquisição de dados do sistema laser interferométrico;
11. Realizar a aquisição de imagem da câmara digital;
12. Se o valor nominal não for igual à gama de medição, voltar ao passo 2;

13. Definir o sentido do percurso que o motor vai fazer “*run down*”;
14. Se o tipo de *run* for diferente do “*run up e down*”;
15. Executar o deslocamento “*Motion 0*”;
16. Desligar o motor;
17. Se o tipo de *run* for igual ao “*run up e down*”;
18. Ligar o motor;
19. Executar o deslocamento “*Motion 3*”;
20. Realizar a leitura do valor nominal;
21. Se o valor nominal não for menor que o passo do deslocamento mais o intervalo de aproximação, voltar ao ponto 19;
22. Executar o deslocamento “*Motion 4*”;
23. Realizar a leitura do valor nominal;
24. Se o valor nominal não for igual ao passo, voltar ao ponto 22;
25. Desligar o motor;
26. Realizar a aquisição de dados do sistema laser interferométrico;
27. Realizar a aquisição de imagem da câmara digital;
28. Se o valor nominal não for igual ao valor nominal a iniciar os ensaios, voltar ao ponto 18;
29. Ligar o motor;
30. Executar o deslocamento “*Motion 0*”;

A figura 6.29 apresenta o fluxograma do algoritmo que permite atribuir capacidade de automação ao equipamento de medição de longo alcance.

P-Valor nominal inicial do ensaio;



106

Capítulo 7: Conclusão e Sugestão para Trabalhos Futuros

O presente capítulo apresenta uma síntese das principais conclusões que foram deduzidas ao longo dos vários capítulos dispostos na presente dissertação, tanto no que se refere ao processo experimental desenvolvido para a calibração de distanciómetros, como com a sua inclusão num procedimento técnico.

São ainda apresentadas neste capítulo conclusões referentes à conceptualização, solução e dimensionamento do projecto de um equipamento de medição de longo alcance.

São ainda descritas algumas das sugestões para a realização de trabalhos futuros a desenvolver no procedimento de calibração de distanciómetros e na concretização do projecto do equipamento de medição de longo alcance.

7.1 Conclusão

O presente trabalho procurou responder de forma adequada aos objectivos propostos tanto na implementação de um procedimento técnico na calibração de distanciómetros, como no desenvolvimento e estudo do projecto de um equipamento de medição de longo alcance.

A metodologia proposta permitiu desenvolver um procedimento experimental para obtenção de medições, em que através da realização de comparação de indicações entre o instrumento de medição a calibrar e o padrão de referência se obtêm os erros de medição. Foi assim realizado um procedimento de calibração de distanciómetros, tendo como base a norma NP EN ISO/IEC 17025 e o qual inclui o cálculo da mensuranda final e o balanço de incerteza de medição. Foram ainda realizados certificados de calibração do distanciómetro utilizado, o distanciómetro *Leica DistoTM D2*, no desenvolvimento deste trabalho.

Desta forma, o objectivo proposto na primeira parte do trabalho foi alcançado com sucesso, acrescentando uma nova valia ao Laboratório de Comprimento (LCO) do Instituto Português da Qualidade (IPQ) através de um novo serviço de calibração, para gamas de medição até 3 m.

O desenvolvimento e estudo do projecto de um equipamento de medição de longo alcance (banco de ensaios de 50 m), correspondeu à segunda parte do trabalho. Foi realizado um projecto, com a apresentação em detalhe do equipamento e dos desenhos de construção que permitirão encontrar uma solução construtiva a aplicar.

A solução vai ao encontro dos objectivos proposto na segunda parte do trabalho, respondendo assim às necessidades do LCO no que se refere à realização de ensaios até uma gama de medição de 50 m com um equipamento automatizado.

7.2 Sugestão para trabalhos futuros

A elaboração da presente dissertação permitiu desenvolver uma metodologia capaz de produzir um procedimento técnico para a calibração de distanciómetros.

Devido ao facto deste trabalho estar limitado no tempo, e à necessidade da constante procura de melhorias, sugere-se que se realize a validação do procedimento técnico através da participação numa comparação interlaboratorial de calibração de distanciómetros. Em função dos resultados obtidos assim se deverá proceder, e caso necessário deve-se efectuar as alterações que levem à melhoria do método/procedimento.

Fica ainda a realização da implementação do projecto de instalação do equipamento de medição longo alcance, banco de ensaios no LCO.

A implementação do projecto deverá ter em conta o estudo de mercado para a aquisição dos materiais e acessórios, tendo em vista os custos de construção, dado que ainda não existe uma data para a implementação do mesmo.

Após a construção e instalação do banco de ensaios será preciso realizar a programação gráfica no *software LabVIEW* para o controlo e aquisição de dados e aquisição de imagem.

No final da implementação do equipamento de medição de longo alcance é fundamental desenvolver um procedimento de utilização do equipamento (com explicações detalhadas de cada um dos sistemas integrantes do projecto).

Bibliografia

- [1] “*Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)*”, Guia ISO/IEC 99, 3ª Ed. IPQ, Caparica, Novembro, 2008, ISBN 972-763-00-6
- [2] “*Pesos e Medidas em Portugal – Exposição Nacional de Metrologia*”, Ed. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 1990, ISBN 972-95341-0-1
- [3] www.bipm.org
- [4] Howarth, Preben e Redgrave, Fiona, *Metrology – In Short*, 3ª Ed. EURAMET, Julho, 2008, ISBN 978-87-988154-5-7
- [5] OIML D 1, “*Elements for a Law on Metrology*”, Ed. 2004 (E)
- [6] Decreto-lei nº 142/2007, 1ª série 82 (07-04-27) pp. 2698 – 2701
- [7] Portaria nº 888/2010, 1ª série 178 (10-09-13) pp.4052 – 4054
- [8] “*Manual da Qualidade da Unidade de Metrologia Científica e Aplicada*”, 7ª Ed. IPQ, Caparica, Julho, 2009
- [9] NP EN ISO/IEC 17025, “*Requisitos gerais de competências para laboratórios de ensaio e calibração*”, 2ª Ed., 2005
- [10] IEC 60825-1, “*Safety of laser products*”, 2ª Ed., 2007
- [11] www.rp-photonics.com/encycloppedia.html
- [12] Webster, John G., “*The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*”, Ed. CRC Press, 1999
- [13] “*User’s Guide 5528A Laser Measurement System*”, Hewlett-Packard Company, Santa Clara, Março, 1992
- [14] Saraiva F., Dias R., Gentil S., “*Calibração de Sistemas Laser Interferométricos em Distâncias no Laboratório de Comprimento*”, IPQ, Caparica
- [15] Hecht, Eugene, “*Óptica*”, 2ª Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Abril, 2002
- [16] Sarrico, Carlos, “*Universo sem fim, uma intorução à astronomia de grande escala, à mecânica clássica e à relatividade*”, 1ª Ed. Esfera do Caos editores, Lisboa, Abril, 2009
- [17] Françon, M., “*Optical Interferometry*”, Ed. Institut D’optique, Academic Press, Paris, 1966
- [18] JCGM 100, “*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, 1ª Ed., Setembro, 2008
- [19] “*Guia para a expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração - GUM*”, 2ª Ed. IPQ, Caparica, Dezembro, 2005, ISBN 972-95341-9-5
- [20] Bucher, Jay L. [et al.], “*The Metrology Handbook – The Measurement Quality Division*”, 1ª Ed. ASQ, 2004
- [21] Certificado de calibração nº 101.13/1001012, IPQ, Caparica, Abril, 2010
- [22] Certificado de calibração nº 101.13/1101465, IPQ, Caparica, Julho, 2011

[23] www.igus.pt

[24] www.ni.com

[25] Branco, Carlos Moura, “*Mecânica dos Materiais Teoria e Aplicações*”, Ed. McGraw-Hill, 1989

[26] Beer, Ferdinand P., Johnston, E. Russell Jr., “*Resistência dos Materiais*”, 3ª Ed. Makron Books, 1996

Anexos

Anexo A: Dados recolhidos no banco de ensaio *SIP* de 3 m

Anexo A: Dados recolhidos no banco de ensaio *SIP* de 3 m

Tabela A.1: Valores de indicação do distanciómetro adquiridos com intervalos de tempo

Valor Nominal <i>L</i> (mm)	Valor de Indicação do distanciómetro (mm)	
	<i>t</i> = 30s	<i>t</i> = 60s
500	500	501
	500	501
	500	501
	501	501
	501	501
	501	501
	501	501
	501	501
	501	501
	501	501
2500	2500	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501
	2501	2501

Tabela A.2: Valores de repetibilidade adquiridos no banco SIP de 3 m

Valor Nominal $L = 500$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	499	499	499	498	498	499	499	500	499	499	499	500
	499	499	498	499	499	498	500	500	499	500	499	499
	498	499	498	499	498	498	500	499	500	499	500	500
	498	498	498	498	498	499	500	499	499	500	499	500
	499	498	498	499	498	498	499	499	500	500	500	500
Valor Médio (mm)	498,6	498,6	498,2	498,6	498,2	498,4	499,6	499,4	499,4	499,6	499,4	499,8
Desvio-padrão (mm)	0,55	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,45
Valor Nominal $L = 1000$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	999	1000	1000	999	1000	999
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	999	1000	1000	1000	1000	1000
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	999	999	1000	1000
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	999	1000	1000	1000	1000	999
Valor Médio (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	999,4	1000	999,8	999,6	1000	999,6
Desvio-padrão (mm)	0,0	0,0	0	0	0	0	0,55	0	0,45	0,55	0	0,55
Valor Nominal $L = 1500$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1500	1499
	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1500	1499	1500	1499	1499	1499
	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1500	1500	1499
	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499
	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1500	1500
Valor Médio (mm)	1499	1499	1499	1499	1499	1499	1499,2	1499	1499,2	1499,2	1499,6	1499,2
Desvio-padrão (mm)	0	0	0	0	0	0	0,45	0	0,45	0,45	0,55	0,45

	Valor Nominal L = 2000 mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	1999	1999	2000	2000
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	2000	2000	2000
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	2000	1999	2000	2000	1999
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	2000	1999	2000	1999
Valor Médio (mm)	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999,2	1999,6	1999,4	1999,4	1999,8	1999,4
Desvio-padrão (mm)	0	0	0	0	0	0	0,45	0,55	0,55	0,55	0,45	0,55
	Valor Nominal L = 2500 mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	2500	2500	2500	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2500	2500	2499	2499	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2499	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2500	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2499	2499	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Valor Médio (mm)	2499,6	2499,8	2499,4	2499,2	2499,4	2499,6	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Desvio-padrão (mm)	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,55	0	0	0	0	0	0
	Valor Nominal L = 3000 mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Valor Médio (mm)	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Desvio-padrão (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	Valor Nominal L = 2000 mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	1999	1999	2000	2000
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	2000	2000	2000
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	2000	1999	2000	2000	1999
	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999	2000	2000	1999	2000	1999
Valor Médio (mm)	1999	1999	1999	1999	1999	1999	1999,2	1999,6	1999,4	1999,4	1999,8	1999,4
Desvio-padrão (mm)	0	0	0	0	0	0	0,45	0,55	0,55	0,55	0,45	0,55
	Valor Nominal L = 2500 mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	2500	2500	2500	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2500	2500	2499	2499	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2499	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2500	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
	2499	2499	2500	2499	2499	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Valor Médio (mm)	2499,6	2499,8	2499,4	2499,2	2499,4	2499,6	2500	2500	2500	2500	2500	2500
Desvio-padrão (mm)	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55	0,55	0	0	0	0	0	0
	Valor Nominal L = 3000 mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Valor Médio (mm)	2999	2999	2999	2999	2999	2999	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Desvio-padrão (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela A.3: Valores de reprodutibilidade adquiridos no banco *SIP* de 3 m

Up

Valor Nominal <i>L</i> (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
500	498,4	499,9998	-1,6	498,6	499,9999	-1,4	498,6	499,9998	-1,4
1000	1000	999,9999	0,0	1000	999,9998	0,0	1000	999,9997	0,0
1500	1499	1499,9999	-1,0	1499	1499,9999	-1,0	1499	1499,9999	-1,0
2000	1999	2000,0004	-1,0	1999	1999,9999	-1,0	1999	2000,0001	-1,0
2500	2499,6	2500,0000	-0,4	2499,2	2500,0002	-0,8	2499,8	2499,9999	-0,2
3000	2999	3000,0000	-1,0	2999	3000,0000	-1,0	2999	3000,0001	-1,0

Down

Valor Nominal <i>L</i> (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
3000	2999	3000,0000	-1,0	2999	3000,0000	-1,0	2999	3000,0001	-1,0
2500	2499,4	2499,9998	-0,6	2499,4	2500,0001	-0,6	2499,6	2500,0001	-0,4
2000	1999	2000,0002	-1,0	1999	2000,0000	-1,0	1999	1999,9999	-1,0
1500	1499	1499,9998	-1,0	1499	1499,9998	-1,0	1499	1500,0001	-1,0
1000	1000	999,9999	0,0	1000	999,9998	0,0	1000	1000,0000	0,0
500	498,2	499,9997	-1,8	498,2	499,9997	-1,8	498,6	499,9999	-1,4

Tabela A.3: Valores de reprodutibilidade adquiridos no banco *SIP* de 3 m (Continuação)**Up**

Valor Nominal <i>L</i> (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
500	499,8	499,9997	-0,2	499,6	499,9997	-0,4	499,4	499,9998	-0,6
1000	999,6	999,9998	-0,4	999,6	999,9999	-0,4	1000	999,9999	0,0001
1500	1499,2	1500,0000	-0,8	1499,2	1499,9996	-0,8	1499	1499,9999	-1,0
2000	1999,4	1999,9999	-0,6	1999,4	2000,0000	-0,6	1999,6	2000,0000	-0,4
2500	2500	2499,9999	0,0001	2500	2500,0002	-0,0002	2500	2500,0000	0
3000	3000	3000,0006	-0,0006	3000	3000,0004	-0,0004	3000	3000,0000	0

Down

Valor Nominal <i>L</i> (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
3000	3000	3000,0006	-0,0006	3000	3000,0004	-0,0004	3000	3000,0000	0
2500	2500	2499,9999	0,0001	2500	2500,0000	0	2500	2500,0000	0
2000	1999,8	2000,0001	-0,2	1999,4	2000,0000	-0,6	1999,2	2000,0001	-0,8
1500	1499,6	1500,0001	-0,4	1499,2	1500,0001	-0,8	1499,2	1500,0000	-0,8
1000	1000	1000,0000	0	999,8	999,9999	-0,2	999,4	999,9998	-0,6
500	499,4	499,9999	-0,6	499,4	499,9999	-0,6	499,6	499,9998	-0,4

Anexo B: Dados recolhidos no banco de ensaio de 50 m

Anexo B: Dados recolhidos no banco de ensaio de 50 m

Tabela B.1: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m

	Valor Nominal $L = 5000$ mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	4999	4999	5000
	4999	4999	5000	4999	5000	5000	5000	5000	5000	4999	5000	5000
	4998	4999	5000	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	4999
	4999	4999	5000	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	4999	5000
	4999	4999	5000	4999	5000	5000	5000	4999	5000	5000	5000	5000
Valor Médio (mm)	4998,8	4999,2	5000	4999,2	5000	5000	5000	4999,8	5000	4999,6	4999,6	4999,8
Desvio-padrão (mm)	0,45	0,45	0	0,45	0	0	0	0,45	0	0,55	0,55	0,45
	Valor Nominal $L = 10000$ mm											
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	10000	10000	9998	10000	10000	9999	9999	9999	10000	9999	10000	10000
	9999	10000	9998	10000	10000	9999	9999	10000	9999	10000	10000	10000
	10000	9999	9998	10000	10000	10000	9999	9999	10000	9999	10001	10001
	9999	10000	9998	10000	10001	10000	9999	10000	10000	10000	10001	10000
	10000	10000	9999	10000	10000	10000	9999	9999	10000	9999	10000	10000
Valor Médio (mm)	9999,6	9999,8	9998,2	10000	10000,2	9999,6	9999	9999,4	9999,8	9999,4	10000,4	10000,2
Desvio-padrão (mm)	0,55	0,45	0,45	0	0,45	0,55	0	0,55	0,45	0,55	0,55	0,45

Tabela B.1: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Valor Nominal $L = 15000$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	14999	14998	14998	14998	14998	14999	14999	14998	14999	14999	14999	14997
	14998	14998	14999	14998	14998	14999	14999	14998	14999	14999	14998	14998
	14999	14998	14998	14999	14998	14998	14998	14998	14999	14999	14999	14999
	14998	14998	14999	14999	14998	14999	14998	14998	14999	14998	15000	14999
	14999	14998	14999	14999	14998	14998	14998	14999	14998	14998	14999	14999
Valor Médio (mm)	14998,6	14998	14999	14998,6	14998	14998,6	14998,4	14998,2	14998,8	14998,6	14999	14998,4
Desvio-padrão (mm)	0,55	0	0,55	0,55	0	0,55	0,55	0,45	0,45	0,55	0,70	0,89
Valor Nominal $L = 20000$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	19997	19996	19997	19998	19999	19998	19998	19996	19996	19997	19998	19999
	19998	19996	19998	19997	19999	19999	19998	19996	19996	19997	19997	20000
	19997	19996	19997	19998	19999	19997	19998	19996	19996	19997	19998	19999
	19997	19997	19997	19998	19998	19999	19997	19996	19996	19997	19998	20000
	19998	19997	19997	19998	19999	19998	19998	19996	19995	19997	19998	19999
Valor Médio (mm)	19997,4	19996,4	19997,2	19997,8	19998,8	19998,2	19997,8	19996	19995,8	19997	19997,8	19999,4
Desvio-padrão (mm)	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,84	0,45	0	0,45	0	0,45	0,55

Tabela B.1: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Valor Nominal $L = 25000$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	24993	24999	25001	25003	24999	24999	24998	25001	24999	25000	24999	25000
	24993	24999	25001	25003	24999	24998	24998	25001	25000	25000	24999	25000
	24992	24998	25001	25003	24999	24999	25000	25001	24998	25001	24999	25000
	24993	24999	25000	25003	24998	24998	25000	25000	25000	25000	24999	24999
	24993	24999	25000	25003	24998	24997	25000	25000	24999	25001	24999	24999
Valor Médio (mm)	24992,8	24998,8	25000,6	25003	24998,6	24998,2	24999,2	25000,6	24999,2	25000,4	24999	24999,6
Desvio-padrão (mm)	0,45	0,45	0,55	0	0,55	0,84	1,10	0,55	0,84	0,55	0	0,55
Valor Nominal $L = 30000$ mm												
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	29991	29993	29993	29991	29995	29991	29993	29992	29993	29993	29993	29993
	29989	29996	29994	29989	29996	29993	29993	29995	29993	29995	29992	29993
	29992	29996	29994	29992	29992	29993	29994	29989	29994	29993	29991	29994
	29993	29991	29991	29993	29992	29996	29994	29992	29997	29991	29992	29997
	29993	29996	29992	29993	29997	29996	29992	29989	29995	29998	29993	29995
Valor Médio (mm)	29991,6	29994,4	29992,8	29991,6	29994,4	29993,8	29993,2	29991,4	29994,4	29994	29992,2	29994,4
Desvio-padrão (mm)	1,67	2,30	1,30	1,67	2,3	2,17	0,84	2,51	1,67	2,65	0,84	1,67

Tabela B. 2: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m

Up

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
5000	4998,8	4999,5576	-0,8	4999,2	4999,9911	-0,8	5000	5000,0413	-0,04
10000	9999,6	9999,9882	-0,4	9999,8	9999,9175	-0,1	9998,2	9999,9796	-1,8
15000	14998,6	14999,9732	-1,4	14998	15000,8050	-2,8	14998,6	15000,0912	-1,5
20000	19997,4	19999,9705	-2,6	19996,4	19999,7252	-3,3	19997,2	20000,0152	-2,8
25000	24992,8	24994,5991	-1,8	24998,8	24999,5018	-0,7	25000,6	25000,5824	0,02
30000	29991,6	29998,7152	-7,1	29994,4	29999,9803	-5,6	29992,8	30000,0684	-7,3

Down

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
30000	29991,6	29998,7152	-7,1	29994,4	30000,1576	-5,8	29993,8	29999,6758	-5,9
25000	25003	25003,8480	-0,8	24998,6	25000,3452	-1,8	24998,2	24999,6182	-1,4
20000	19997,8	20000,0032	-2,2	19998,8	20000,0136	-1,2	19998,2	20000,7006	-2,5
15000	14998,6	15000,0829	-1,5	14998	15000,1862	-2,2	14998,6	15000,7006	-2,1
10000	10000	10000,0554	-0,1	10000,2	10000,0882	0,1	9999,6	10000,7229	-1,1
5000	4999,2	4999,9911	-0,8	5000	5000,0410	-0,04	5000	5000,4266	-0,4

Tabela B.2: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=30000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Up

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
5000	5000	4999,992	0,008	4999,8	5000,0819	-0,3	5000	5000,098	-0,1
10000	9999	9999,9056	-0,9	9999,4	10000,0729	-0,7	9999,8	9999,6883	0,1
15000	14998,4	14999,9879	-1,6	14998,2	14999,992	-1,8	14998,8	14999,9447	-1,1
20000	19997,8	19999,8129	-2,0	19996	19999,6043	-3,6	19995,8	19999,8292	-4,0
25000	24999,2	24999,7604	-0,6	25000,6	24999,9361	0,7	24999,2	24999,1559	0,04
30000	29993,2	29999,9626	-6,8	29991,4	29999,9483	-8,5	29994,4	29999,855	-5,5

Down

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
30000	29994	30000,3228	-6,3	29992,2	30000,8693	-8,7	29994,4	29999,855	-5,5
25000	25000,4	25000,617	-0,2	24999	25000,0683	-1,1	24999,6	25000,6091	-1,0
20000	19997	20000,4195	-3,4	19997,8	20000,6263	-2,8	19999,4	20000,5755	-1,2
15000	14998,6	15000,3862	-1,8	14999	15000,0412	-1,0	14998,4	14999,9788	-1,6
10000	9999,4	10000,4272	-1,0	10000,4	10000,3351	0,06	10000,2	10000,294	-0,1
5000	4999,6	5000,0339	-0,4	4999,6	4999,9752	-0,4	4999,8	5000,2124	-0,4

Tabela B. 3: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m

Valor Nominal $L = 5000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	4999	4999	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	4999	5001	5000	5000	5000	5000	5001
	4999	5000	5000	5000	5000	4999	5000	5000	5000	5000	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5001
	4999	5000	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5001	5000	5000	5000	5000	5001
	4999	5000	4999	5000	5000	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5001	5001	5000	5000	5001
	4999	4999	4999	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5001	5001	5000	5001	5000	5001
Valor Médio (mm)	4999	4999,6	4999,2	5000	5000	4999,6	5000	5000	5000	5000	4999,8	4999,8	5000,6	5000,4	5000	5000,2	5000	5001
Desvio-padrão (mm)	0	0,55	0,45	0	0	0,55	0	0	0	0	0,45	0,45	0,55	0,55	0	0,45	0	0
Valor Nominal $L = 10000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	10000	10000	10000	10001	10001	10001	10000	10000	9999	10000	10001	999	10001	10000	10001	10001	10001	10001
	9999	10000	10001	10000	10001	10000	10000	10001	10000	10000	10001	10000	10001	10001	10001	10001	10001	10001
	9999	10000	10000	10000	10001	10001	10000	10001	999	10001	10001	10000	10001	10001	10001	10001	10001	10001
	9999	9999	10000	10001	10001	10002	10000	10001	10000	10000	10000	10000	10001	10001	10001	10001	10001	10001
	9999	9999	10000	10000	10001	10002	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10001	10001	10001	10001	10001	10001
Valor Médio (mm)	9999,2	9999,6	10000,2	10000,4	10001	10001,2	10000	10000,6	999,6	10000,2	10000,6	9999,8	10001	1000,8	10001	10001	10001	10001
Desvio-padrão (mm)	0,45	0,55	0,45	0,55	0	0,84	0	0,55	0,55	0,45	0,55	0,45	0	0,45	0	0	0	0
Valor Nominal $L = 15000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	15000	15000	15000	15000	15000	14999	14998	14999	14998	15000	14999	15000	15001	15000	15001	15001	15001	15001
	15000	15000	15001	15000	15000	15000	14998	14999	14998	14999	14999	15000	14999	15000	15001	15001	15000	15001
	14999	15000	15000	14999	15001	14999	14998	14999	14999	15000	14999	15000	15000	14999	15001	15000	15000	15001
	15000	15000	15001	15000	15000	15000	14998	14999	14998	14999	14998	15000	15000	15001	15000	15001	15000	15001
	15000	15000	15000	15001	15000	15000	14997	14999	14999	15000	14998	14999	15000	15000	15001	15000	15000	15001
Valor Médio (mm)	14999,8	15000	15000,4	15000	15000,2	14999,6	14997,8	14999	14998,4	14999,6	14998,6	14999,8	15000	15000	15000,8	15000,6	15000,2	15001
Desvio-padrão (mm)	0,45	0	0,55	0,71	0,45	0,55	0,45	0	0,55	0,55	0,55	0,45	0,71	0,71	0,45	0,55	0,45	0
Valor Nominal $L = 20000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	19998	19999	19999	19997	19998	19998	19997	19996	19997	19997	19998	19998	19997	19998	19997	19997	19997	19998
	19998	19999	19999	19999	19999	19999	19997	19996	19997	19997	19997	19998	19998	19997	19998	19997	19998	19998
	19997	19999	20000	19998	19999	19999	19996	19996	19997	19997	19997	19999	19998	19997	19998	19997	19999	19998
	19997	19999	19999	19998	19999	20000	19997	19996	19997	19997	19997	19998	19998	19998	19998	19998	19997	19998
	19998	19999	19999	19998	19998	19999	19997	19996	19997	19997	19997	19998	19998	19997	19998	19997	19999	19999
Valor Médio (mm)	19997,6	19999	19999,2	19998	19998,6	19999	19996,8	19996	19997	19997	19998,2	19998	19997,2	19998	19997,2	19997,6	19997,8	19998,2
Desvio-padrão (mm)	0,55	0	0,45	0,71	0,55	0,71	0,45	0	0	0	0,45	0	0,45	0	0,45	0,45	1,10	0,45

Tabela B.3: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Valor Nominal $L = 25000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	25001	25001	25001	25003	25000	25000	24999	25001	24998	25000	24999	24999	2499	24999	24999	24997	24997	24997
	24999	25001	25000	25002	25000	25000	24999	25000	24999	24999	24999	25000	24996	24998	24998	24998	24997	24998
	25000	25001	25000	25003	24999	25001	24998	25001	24998	24999	25000	24999	24998	24999	24997	24998	24997	24999
	25000	25001	25001	25002	25000	25000	24998	25000	24999	24999	24999	24999	24998	24998	24998	24998	24996	24998
	25000	25001	25001	25002	25000	24999	24999	25000	24999	24999	24999	24998	24998	24998	24998	24998	24997	24998
Valor Médio (mm)	25000	25001	25000,6	25002,4	24999,8	25000	24998,6	25000,4	24998,6	24999,2	24999,2	24999	24997,8	24998,4	24998	24997,8	24996,8	24998
Desvio-padrão (mm)	0,71	0	0,55	0,55	0,45	0,71	0,55	0,54	0,55	0,45	0,45	0,71	1,10	0,55	0,71	0,45	0,45	0,71
Valor Nominal $L = 30000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	29995	29993	29995	29992	29992	29993	29994	29992	29994	29994	29997	29993	29993	29991	29991	29991	29992	29993
	29996	29994	29995	29992	29994	29993	29993	29995	29995	29995	29997	29993	29992	29992	29993	29992	29993	29991
	29992	29995	29995	29992	29995	29993	29994	29994	29995	29997	29997	29993	29993	29992	29992	29991	29992	29991
	29992	29994	29996	29996	29995	29994	29991	29994	29995	29992	29996	29333	29992	29992	29992	29992	29993	29992
	29992	29993	29994	29996	29993	29995	29993	29994	29995	29996	29996	29991	29992	29992	29992	29993	29996	29993
Valor Médio (mm)	29993,4	29993,8	29995	29993,6	29993,8	29993,6	29993	29993,8	29994,8	29994,8	29996,6	29992,6	29992,4	29991,8	29992	29991,8	29993,2	29992
Desvio-padrão (mm)	1,95	0,84	0,71	2,19	1,30	0,89	1,22	1,10	0,45	1,92	0,55	0,89	0,55	0,45	0,71	0,84	1,64	1,00
Valor Nominal $L = 35000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	34992	34992	34992	34984	34994	34991	34982	34989	34988	34983	34989	34988	34985	34987	34984	34986	34984	34985
	34991	34994	34991	34984	34994	34991	34982	34986	34992	34986	34987	34990	34985	34985	34984	34985	34985	34985
	34992	34996	34992	34983	34992	34995	34985	34990	34985	34986	34988	34990	34985	34986	34984	34985	34981	34984
	34988	34995	34992	34985	34991	34994	34985	34987	34985	34984	34987	34988	34985	34985	34982	34985	34984	34983
	34986	34994	34990	34983	34991	34991	34983	34987	34988	34985	34989	34988	34984	34986	34984	34984	34984	34983
Valor Médio (mm)	34989,9	34994,2	34991,4	34983,8	34992,4	34992,4	34983,4	34987,8	34987,6	34984,8	34988	34988,8	34984,8	34985,8	34983,6	34985	34983,6	34984
Desvio-padrão (mm)	2,68	1,48	0,89	0,84	1,52	1,95	1,52	1,64	2,88	1,30	1,00	1,10	0,45	0,84	0,89	0,71	1,52	1,00
Valor Nominal $L = 40000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	39984	39983	39981	39981	39981	39981	39984	39984	39986	39982	39979	39984	39981	39977	39981	39980	39981	39976
	39982	39983	39980	39980	39981	39984	39985	39985	39984	39979	39975	39980	39980	39977	39982	39977	39983	39977
	39982	39982	39982	39981	39983	39982	39985	39987	39983	39979	39978	39982	39981	39976	39979	39978	39985	39980
	39989	39983	39984	39980	39982	39986	39985	39989	39982	39981	39976	39982	39985	39977	39981	39977	39985	39976
	39982	39980	39982	39981	39978	39982	39984	39984	39982	39984	39976	39982	39981	39976	39982	39980	39980	39977
Valor Médio (mm)	39983,8	39982,2	39981,8	39980,6	39981	39983	39984,6	39985,8	39983,4	39981	39976,8	39982,2	39981,6	39976,6	39981	39978,4	39982,8	39977,2
Desvio-padrão (mm)	3,03	1,30	1,48	0,55	1,87	2,00	0,55	2,17	1,67	2,12	1,64	1,48	1,95	0,55	1,22	1,52	2,28	1,64

Tabela B.3: Valores de repetibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Valor Nominal $L = 45000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	44974	44986	44982	44992	44984	44980	44984	44988	44983	44980	44991	44985	44967	44970	44972	44970	44969	44972
	44975	44989	44982	44992	44985	44977	44984	44990	44983	44982	44984	44987	44967	4497	44970	44970	44967	44970
	44976	44987	44981	44993	44982	44983	44981	44987	44984	44979	44988	44988	44968	44969	44970	44972	44967	44971
	44974	44989	44986	44986	44987	44981	44983	44982	44980	44979	44985	44984	44968	44969	44970	44970	44967	44972
	44979	44989	44985	44992	44986	44983	44981	44983	44982	44981	44991	44985	44966	44969	44970	44970	44967	44972
Valor Médio (mm)	44975,6	44988	44983,2	44991	44984,8	44980,8	44982,6	44986	44982,4	44980,2	44987,8	44985,8	44967,2	44969,4	44970,4	44970,4	44967,4	44971,4
Desvio-padrão (mm)	2,07	1,41	2,17	2,83	1,92	2,49	1,52	3,39	1,52	1,30	3,27	1,64	0,84	0,55	0,89	0,89	0,89	0,89
Valor Nominal $L = 50000$ mm																		
Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	49980	49976	49971	49966	49964	49970	49978	49973	49974	49968	49975	49972	49971	49969	49966	49967	49967	49966
	49982	49973	49974	49964	49963	49971	49979	49974	49974	49969	49974	49974	49972	49970	49967	49969	49967	49968
	49981	49970	49972	49960	49964	49970	49976	49973	49971	49966	49973	49972	49973	49969	49966	49967	49967	49969
	49981	49975	49976	49960	49964	49969	49975	49974	49971	49968	49973	49972	49974	49968	49970	49970	49967	49966
	49979	49975	49972	49961	49965	49967	49977	49974	49972	49967	49972	49971	49971	49969	49966	49967	49969	49966
Valor Médio (mm)	49980,6	49980,6	49973	49962,2	49964	49969,4	49977	49973,6	49972,4	49967,6	49973,4	49972,2	49972,2	49969	49967	49968	49967,4	49967
Desvio-padrão (mm)	1,14	2,39	2,00	2,68	0,71	1,52	1,58	0,55	1,52	1,14	1,14	1,10	1,30	0,71	1,73	1,41	0,89	1,41

Tabela B. 4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m

Up

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
5000	4999	4999,4320	-0,4	4999,6	4999,9005	-0,3	4999,2	5000,0412	-0,8
10000	9999,2	9999,4550	-0,3	9999,6	10000,1848	-0,6	10000,2	9999,5116	0,7
15000	14999,8	14999,7254	0,07	15000	15000,1675	-0,2	15000,4	15000,2885	0,1
20000	19997,6	19999,6658	-2,1	19999	20000,2963	-1,3	19999,2	19999,9341	-0,7
25000	25000	24999,4591	0,5	25001	25000,2720	0,7	25000,6	25000,2737	0,3
30000	29993,4	29999,4591	-6,1	29993,8	29999,4252	-5,6	29995	29999,4205	-4,4
35000	34989,8	35000,3038	-10,5	34994,2	35006,7103	-12,5	34991,4	35002,8069	-11,4
40000	39983,8	40001,4502	-17,7	39982,2	39997,9898	-15,8	39981,8	39998,7085	-16,9
45000	44975,6	44995,0836	-19,5	44988	45006,9917	-19,0	44983,2	45006,1091	-22,9
50000	49980,6	50008,6391	-28,0	49973,8	50001,2915	-27,5	49973	50001,4154	-28,4

Tabela B.4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Down

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
50000	49962,2	49992,8294	-30,6	49964	49991,5819	-27,6	49969,4	49997,5875	-28,2
45000	44991	45007,6612	-16,7	44984,8	45007,2217	-22,4	44980,8	44999,9605	-19,2
40000	39980,6	39999,4439	-18,8	39981	39995,7591	-14,8	39983	39997,5372	-14,5
35000	34983,8	34995,1769	-11,4	34992,4	35002,5146	-10,1	34992,4	35002,6761	-10,3
30000	29993,6	30000,4521	-6,9	29993,8	30000,6812	-6,9	29993,6	30000,2111	-6,6
25000	25002,4	25000,9389	1,5	24999,8	24999,0642	0,7	25000	25000,3974	-0,4
20000	19998	20000,2734	-2,3	19998,6	20000,1465	-1,5	19999	20000,3402	-1,3
15000	15000	15000,4894	-0,5	15000,2	15000,4216	-0,2	14999,6	15000,1812	-0,6
10000	10000,4	10000,6747	-0,3	10001	10000,2352	0,8	10001,2	10000,7067	0,5
5000	5000	5000,2443	-0,2	5000	5000,2294	-0,2	4999,6	5000,0843	-0,5

Tabela B.4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Up

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
5000	5000	5000,1919	-0,2	5000	5000,1061	-0,1	5000	5000,2578	-0,3
10000	10000	10000,516	-0,5	10000,6	10000,5118	0,1	9999,6	10000,5756	-1,0
15000	14997,8	14999,9556	-2,2	14999	15000,0272	-1,0	14998,4	14999,9818	-1,6
20000	19996,8	20000,019	-3,2	19996	19999,9645	-4,0	19997	20000,1588	-3,2
25000	24998,6	24999,6273	-1,0	25000,4	24999,7624	0,6	24998,6	25000,7364	-2,1
30000	29993	29999,7605	-6,8	29993,8	29999,7624	-6,0	29994,8	29999,8273	-5,0
35000	34983,4	34999,358	-16,0	34987,8	35000,6291	-12,8	34987,6	34999,114	-11,5
40000	39984,6	40000,1318	-15,5	39985,8	39999,7084	-13,9	39983,4	40000,1028	-16,7
45000	44982,6	45007,0551	-24,5	44986	45007,1412	-21,1	44982,4	45004,1132	-21,7
50000	49977	50004,5476	-27,5	49973,6	50003,9225	-30,3	49972,4	49999,5922	-27,2

Tabela B.4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Down

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
50000	49967,6	49996,8662	-29,3	49973,4	50002,3646	-29,0	49972,2	50001,2626	-29,1
45000	44980,2	45003,8472	-23,6	44987,8	45006,0794	-18,3	44985,8	45008,0464	-22,2
40000	39981	39996,1624	-15,2	39976,8	39994,1803	-17,4	39982,2	39999,9265	-17,7
35000	34984,8	35000,6963	-15,9	34988	35000,7175	-12,7	34988,8	35003,3756	-14,6
30000	29994,8	30000,0092	-5,2	29996,6	30000,7551	-4,2	29992,6	29999,8443	-7,2
25000	24999,2	25000,6975	-1,5	24999,2	25000,747	-1,5	24999	25000,3191	-1,3
20000	19997	19999,6157	-2,6	19998,2	20000,5608	-2,4	19998	19999,9583	-2,0
15000	14999,6	15000,6766	-1,1	14998,6	15000,0018	-1,4	14999,8	15000,184	-0,4
10000	10000,2	10000,6103	-0,4	10000,6	10000,7448	-0,1	9999,8	9999,8061	-0,006
5000	5000	5000,3471	-0,3	4999,8	4999,9422	-0,1	4999,8	5000,008	-0,2

Tabela B.4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Up

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
5000	5000,6	4999,9969	0,6	5000,4	5000,0078	0,4	5000	5000,0544	-0,05
10000	10001	10000,1019	0,9	10000,8	9999,9203	0,9	10001	10000,2231	0,8
15000	15000	15000,0083	-0,008	15000	14999,9998	0,0002	15000,8	15000,264	0,5
20000	19997,2	19999,685	-2,5	19998	20000,1679	-2,2	19997,2	19999,7374	-2,5
25000	24997,8	24999,6436	-1,8	24998,4	24999,7459	-1,3	24998	25000,3707	-2,4
30000	29992,4	29999,9295	-7,5	29991,8	29999,9662	-8,2	29992	29999,3795	-7,4
35000	34984,8	34999,1572	-14,4	34985,8	35000,1869	-14,4	34983,6	34999,2368	-15,6
40000	39981,6	40001,6374	-20,0	39976,6	39998,2166	-21,6	39981	39999,2086	-18,2
45000	44967,2	44997,5813	-30,4	44969,4	45000,4818	-31,1	44970,4	45000,8352	-30,4
50000	49972,2	50004,0526	-31,9	49969	50002,0792	-33,1	49967	50000,0894	-33,1

Tabela B.4: Valores de reprodutibilidade até o valor nominal $L=50000$ mm adquiridos no banco de 50 m (Continuação)

Down

Valor Nominal L (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)	Valor de Indicação do distanciômetro (mm)	Valor do Sistema Laser Interferométrico (mm)	Erro de Medição (mm)
50000	49968	50000,2559	-32,3	49967,4	50000,5202	-33,1	49967	49999,5736	-32,6
45000	44970,4	45000,6876	-30,3	44967,4	44998,7888	-31,4	44971,4	45000,7329	-29,3
40000	39978,4	39998,9983	-20,6	39982,8	40000,2227	-17,4	39977,2	39999,2094	-22,0
35000	34985	34999,2056	-14,2	34983,6	34999,1981	-15,6	34984	35000,1515	-16,2
30000	29991,8	30000,1869	-8,4	29993,2	30000,3582	-7,2	29992	30000,2308	-8,2
25000	24997,8	24999,9639	-2,2	24996,8	24999,5414	-2,7	24998	25000,5646	-2,6
20000	19997,6	19999,9607	-2,4	19997,8	19999,9555	-2,2	19998,2	19999,9833	-1,8
15000	15000,6	15000,026	0,6	15000,2	15000,0528	0,1	15001	15000,4486	0,6
10000	10001	10000,0193	1,0	10001	9999,943	1,1	10001	9999,9451	1,1
5000	5000,2	4999,9702	0,2	5000	4999,9531	0,04	5001	5000,078	0,9

Anexo C: Balanço da Incerteza de Medição

Anexo C: Balanço da Incerteza de Medição

Tabela C.1: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=5000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	5000	$3,75 \times 10^{-9}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$6,05 \times 10^{-7}$	$6,05 \times 10^{-7}$	5000	0,0030
Repetibilidade	$u(q)$	0,55	0,55	1	0,55
Reprodutibilidade	$u(e)$	0,41	0,41	1	0,41
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,00040	0,00023	1	0,00023
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					0,74447
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					1,5

Tabela C. 2: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=10000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	10000	$7,5 \times 10^{-9}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$1,51 \times 10^{-7}$	$1,51 \times 10^{-7}$	10000	0,0015
Repetibilidade	$u(q)$	0,84	0,84	1	0,84
Reprodutibilidade	$u(e)$	0,66	0,66	1	0,66
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,00081	0,00047	1	0,00047
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					1,10507
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					2,2

Tabela C. 3: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=15000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	15000	$1,13 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$6,72 \times 10^{-8}$	$6,72 \times 10^{-8}$	15000	0,0010
Repetibilidade	$u(q)$	0,71	0,71	1	0,71
Reprodutibilidade	$u(e)$	0,78	0,78	1	0,78
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0012	0,00070	1	0,00070
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					1,09024
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					2,2

Tabela C. 4: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=20000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	20000	$1,50 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$3,78 \times 10^{-8}$	$3,78 \times 10^{-8}$	20000	0,00076
Repetibilidade	$u(q)$	1,10	1,10	1	1,10
Reprodutibilidade	$u(e)$	0,76	0,76	1	0,76
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0016	0,00093	1	0,00093
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					1,36528
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					2,7

Tabela C. 5: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=25000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	25000	$1,88 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$2,42 \times 10^{-8}$	$2,42 \times 10^{-8}$	25000	0,00061
Repetibilidade	$u(q)$	1,10	1,10	1	1,10
Reprodutibilidade	$u(e)$	1,34	1,34	1	1,34
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0020	0,0012	1	0,0012
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					1,75593
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					3,5

Tabela C. 6: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=30000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	30000	$2,25 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$1,68 \times 10^{-8}$	$1,68 \times 10^{-8}$	30000	0,00050
Repetibilidade	$u(q)$	2,19	2,19	1	2,19
Reprodutibilidade	$u(e)$	1,27	1,27	1	1,27
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0024	0,0014	1	0,0014
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					2,54837
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					5,1

Tabela C. 7: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=35000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	35000	$2,63 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$1,23 \times 10^{-8}$	$1,23 \times 10^{-8}$	35000	0,00043
Repetibilidade	$u(q)$	2,88	2,88	1	2,88
Reprodutibilidade	$u(e)$	2,12	2,12	1	2,12
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0028	0,0016	1	0,0016
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					3,58663
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					7,2

Tabela C. 8: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=40000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	40000	$3,00 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$9,45 \times 10^{-9}$	$9,45 \times 10^{-9}$	40000	0,00038
Repetibilidade	$u(q)$	3,03	3,03	1	3,03
Reprodutibilidade	$u(e)$	2,40	2,40	1	2,40
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0032	0,0019	1	0,0019
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					3,88038
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					7,8

Tabela C. 9: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=45000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	45000	$3,38 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$7,47 \times 10^{-9}$	$7,47 \times 10^{-9}$	45000	0,00034
Repetibilidade	$u(q)$	3,39	3,39	1	3,39
Reprodutibilidade	$u(e)$	5,03	5,03	1	5,03
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0036	0,0021	1	0,0021
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					6,07559
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					12

Tabela C. 10: Balanço da incerteza de medição para o valor nominal $L=50000$ mm

Grandeza de Entrada X_i	Componente da Incerteza $u(x_i)$	Estimativa x_i (mm)	Incerteza-padrão $u(x_i)$ (mm)	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$ (mm)
Padrão de Referência	$u(ref_{HP})$	$7,50 \times 10^{-13}$	$7,50 \times 10^{-13}$	50000	$3,75 \times 10^{-8}$
Erro do Coseno	$u(cos)$	$6,05 \times 10^{-9}$	$6,05 \times 10^{-9}$	50000	0,00030
Repetibilidade	$u(q)$	2,68	2,68	1	2,68
Reprodutibilidade	$u(e)$	2,20	2,20	1	2,20
Resolução do um Dispositivo Afixador	$u(r)$	0,5	0,29	1	0,29
Alinhamento do Distanciômetro	$u(ali_{dist})$	0,0040	0,0023	1	0,0023
Incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída $u(y)$ (mm)					3,48351
Incerteza de Medição Expandida U (mm)					7,0

**Anexo D: Certificado de Calibração/Relatório
de Ensaio do Distanciómetro**

Anexo D: Certificado de Calibração/Relatório de Ensaio do Distanciómetro

RESUMO DO METODO:

O princípio de medição consiste na determinação do erro de medição, por comparação entre o valor de indicação do distanciómetro e o valor de indicação do interferómetro laser para o mesmo valor nominal.

RESULTADO:

Valor nominal (mm)	Erro de medição (mm)	Incerteza expandida U (mm)
5000	-0,1	1,5
10000	0,3	2,2
15000	-0,4	2,2
20000	-2,2	2,7
25000	-0,9	3,5
30000	-6,5	5,1
35000	-13,3	7,2
40000	-17,5	7,8
45000	-22,9	12
50000	-29,9	7,0

Notas:

1. A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza padrão multiplicada pelo factor de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, Dezembro 2005).
2. A estabilidade a longo prazo do instrumento de medição não foi considerada.

Anexo E: Procedimento Técnico da Calibração de Distanciómetros

Anexo E: Procedimento Técnico da Calibração de Distanciómetros

a) Designação

Calibração de instrumento de medição de distâncias lineares “distanciómetro”.

b) Objectivo e Âmbito

Este procedimento tem como objectivo a descrição do método e sequência a realizar na calibração de instrumentos de medição de distâncias lineares “Distanciómetro”, por comparação entre o valor de indicação do distanciómetro e o valor de indicação do padrão de referência em ensaios realizados no banco de ensaios de 50 m.

c) Definições

- **Indicação:** Valor de uma grandeza fornecido por um instrumento de medição ou um sistema de medição.
- **Erro de medição:** Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.
- **Resolução de um dispositivo afixador:** A menor diferença entre indicações afixadas que podem ser distinguidas significativamente.
- **Incerteza de medição expandida:** Produto da incerteza-padrão combinada por um factor superior a um.
- **Gama de medição:** Valor absoluto da diferença entre valores extremos do intervalo nominal de indicação.
- **Valor nominal:** Valor arredondado ou aproximado de uma grandeza que caracteriza um instrumento de medição ou um sistema de medição que serve de guia para a sua utilização.

d) Descrição

d.1) Descrição do tipo de item a calibrar

O item a calibrar é um instrumento de medição de distâncias linear com feixe laser “Distanciômetro”.

d.2) Parâmetros, grandezas e gamas de medição

A grandeza a determinar é o erro de medição e a respectiva incerteza de medição expandida.

A gama de medição para realizar os ensaios é de 50 m.

d.3) Padrões de trabalho e equipamento necessário

O padrão de referência e os equipamentos necessários para realizar os ensaios na calibração de instrumentos de medição de distâncias lineares “distanciômetro” são os seguintes:

- Sistema laser interferométrico;
- Banco de ensaio de 50 m;
- Barômetro;
- Sistema de aquisição de temperaturas, com 10 sensores e resolução de 0,001 °C;
- Dois Tripés reguláveis;
- Acessórios de fixação e posição;
- Computador com *software LabVIEW* e placa de aquisição de dados GPIB;

d.4) Condições ambientais e tempos de estabilização

Temperatura de referência: 20 °C.

Condição de funcionamento de referência:

- Realizar os ensaios se a temperatura ambiente estiver (20 ± 1) °C;

d.5) Descrição do modo operatório

O modo operatório consiste na determinação do erro de medição por comparação entre o valor de indicação do distanciômetro e o valor de indicação do padrão de referência, sistema laser interferométrico e consequente avaliação da incerteza de medição expandida.

A iniciação do processo para realizar ensaios na calibração de instrumentos de medição de distâncias lineares com feixe laser “distanciómetro” deve seguir os seguintes passos:

- Efectuar a montagem do sistema laser interferométrico HP, colocando a unidade laser no tripé regulável e montar os acessórios ópticos paralelamente ao banco de ensaios, através da colocação do cubo retroreflector móvel no sistema de movimentação (carro) do banco de ensaios de 50 m, e seguidamente efectuar a montagem do divisor de feixe e cubo retroreflector fixo, que se encontram ligados, na estrutura de suporte do banco de ensaios de 50 m;
- Fazer a ligação do sistema laser interferométrico HP ao computador com a placa de aquisição de dados GPIB;
- Realizar o alinhamento do sistema laser interferométrico HP através da técnica descrita na figura 1;

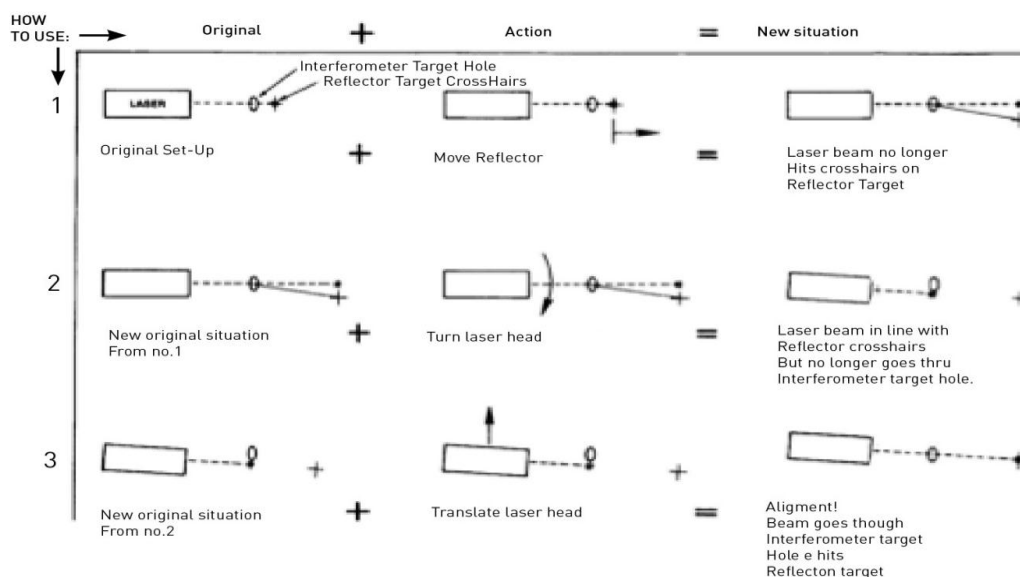


Figura E.1: Alinhamento do sistema laser interferométrico HP

- Realizar a montagem do instrumento de medição de distâncias lineares com feixe laser “distanciómetro” no segundo tripe regulável paralelamente ao banco de ensaios de 50 m utilizando acessório de fixação e fixação;
- Realizar o alinhamento do distanciómetro através da deslocação do sistema de movimentação (carro) do banco de ensaios de 50 m, analisa-se para que lado o feixe laser se desloca ao longo da placa alvo solidária com o carro. Assumindo o deslocamento coloca-se o sistema de movimentação no ponto inicial e executa-se o movimento de rotação no tripé em sentido contrário ao desalinhamento verificado. O movimento de rotação deve exceder o centro da placa alvo, e em seguida efectua-se a

compensação através do movimento de translação do tripé em sentido contrário. De seguida faz-se percorrer o sistema de movimentação do banco de ensaios de 50 m, toda a sua gama de medição para verificar o alinhamento;

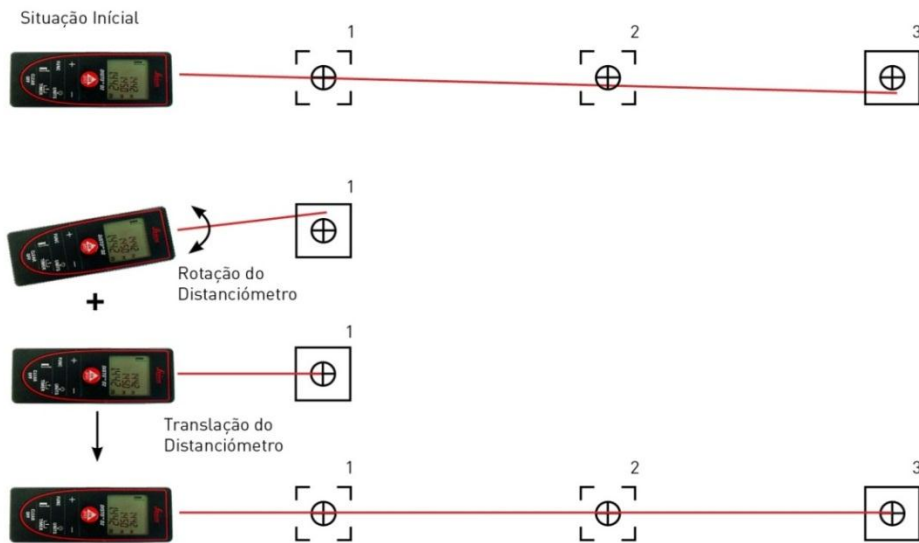


Figura E.2: Alinhamento do distanciômetro

- Ligar o sistema de aquisição de temperaturas e o barómetro junto à área de trabalho para se registar as condições de referência;
- Realizar os ensaios para os valores nominais, $L=5000$ mm a $L=50000$ mm, dentro da gama de medição do banco de ensaio de 50 m.

d.6) Método de registo das observações e dos resultados

Os registos dos valores de indicação do distanciômetro são efectuados numa folha de registo e posteriormente introduzidos na folha de cálculo Excel.

Esta folha é a mesma que é gerada através no *software LabVIEW* na aquisição de dados com os valores de indicação do sistema laser interferométrico.

A determinação do erro de medição é realizada através da seguinte equação:

$$e = x_{dist} - x_{ref} \text{ (mm)}$$

Onde:

x_{dist} – Valor de indicação do instrumento de medição de distâncias lineares com feixe laser “distanciômetro”

x_{ref} – Valor de indicação do padrão de referência “sistema laser interferométrico”

d.7) Critério e/ou requisito para aceitação ou rejeição de um valor de aquisição

Não aplicável, todos os valores de aquisição contribuem para o valor medido e a sua dispersão é avaliada através do desvio-padrão.

e) Balanço de Incertezas

O balanço da incerteza de medição na calibração de instrumentos de medição de distâncias lineares com feixe laser “distanciômetro” é:

e.1) Contribuição para a incerteza-padrão do sistema laser interferométrico

- **Padrão de referência**

Do certificado de calibração do sistema laser interferométrico HP 5508A é obtido o valor da incerteza de medição expandida U e o valor do factor de expansão k permitindo calcular a incerteza-padrão do componente padrão de referência através da seguinte equação:

$$u(ref_{HP}) = \frac{U}{k}$$

- **Erro do coseno**

O erro do coseno está presente no sistema laser interferométrico, e quando o carro do banco de ensaio é deslocado ao longo duma distância linear e que exista uma mudança do espaçamento entre os dois feixes lasers que incidem no orifício da unidade laser sendo dado pela seguinte equação:

$$u(cos) = \frac{d^2}{8D^2} L$$

Onde:

d - diferença entre os dois feixes que incidem na unidade laser

D - distância percorrida pelo cubo retrorreflector móvel

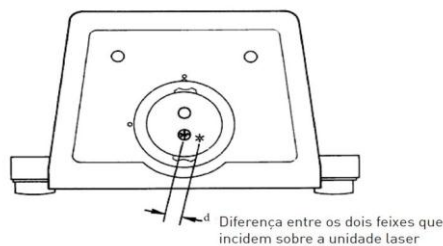


Figura E. 3: Verificação do erro do coseno

e.2) Contribuição para a incerteza-padrão do distanciómetro

- **Repetibilidade**

A repetibilidade é o desvio-padrão dos valores de indicação do distanciómetro obtidos para cada valor nominal e com pelo menos cinco aquisições observadas ($n \geq 5$).

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

- **Reprodutibilidade**

A reprodutibilidade é o desvio-padrão do erro de medição calculado a partir da diferença do valor de indicação do distanciómetro subtraindo com o valor de indicação do sistema laser interferométrico para cada valor nominal.

$$s(e) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}$$

- **Resolução de um dispositivo afixador**

A resolução do dispositivo afixador do distanciómetro é atribuída uma distribuição rectangular $\left[-\frac{R}{2}, +\frac{R}{2}\right]$. Esta distribuição é a probabilidade de estimar um valor dentro de um intervalo de limite superior e inferior a_+ e a_- da grandeza X_i .

$$u(r) = \frac{\frac{r}{2}}{\sqrt{3}}$$

- **Alinhamento do distanciómetro**

O alinhamento do distanciómetro é obtido a partir da capacidade de alinhar o instrumento de medição dentro da placa alvo, desde do centro à extremidade da placa alvo, sendo o desalinhamento máximo na gama de medição total do banco de ensaio. Considerado l a aresta

da placa alvo, e $L_{m\acute{a}x}$ a gama de medição total do banco de ensaio obtemos o angulo máximo que o feixe laser do distanciómetro pode sofrer.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\frac{l}{2}}{L_{m\acute{a}x}}$$

Através de outra equação trigonométrica é obtido a distância do distanciómetro d_{dist} à placa alvo.

$$d_{dist} = \frac{L}{\cos \alpha}$$

A incerteza-padrão associada ao alinhamento do distanciómetro é obtida a partir da seguinte equação:

$$u(al_{i_{dist}}) = \frac{|L - d_{dist}|}{\sqrt{3}}$$

Onde:

l - Aresta da placa alvo

$L_{m\acute{a}x}$ - Gama de medição total do banco de ensaios

d_{dist} - Distância do distanciómetro à placa alvo

L - Valor nominal

e.3) Lista dos componentes do balanço de incertezas para a calibração de distanciómetros

A tabela 1 apresenta o resumo das grandezas dos componentes d balanço da incerteza de medição da calibração de instrumentos de medição de distâncias lineares com feixe laser “distanciómetro”.

Tabela 1: Balanço da incerteza de medição

Componente da incerteza-padrão $u(x_i)$	Distribuição	Incerteza-padrão $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição para a Incerteza-padrão $u_i(y)$
Sistema Laser Interferométrico SH				
Padrão de Referência $u(ref_{HP})$	Normal	$\frac{U}{k}$	1	$\frac{U}{k}$
Erro do Coseno $u(cos)$	Rectangular	$\frac{d^2}{8D^2}$	L	$\frac{d^2}{8D^2}L$
Distanciômetro				
Repetibilidade $u(q)$	Normal	$s(q)$	1	$s(q)$
Reprodutibilidade $u(e)$	Normal	$s(e)$	1	$s(e)$
Resolução de um Dispositivo Afixador $u(r)$	Rectangular	$\frac{r}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{r}{\sqrt{3}}$
Alinhamento do Distanciômetro $u(ali_{dist})$	Rectangular	$\frac{ L - d_{dist} }{\sqrt{3}}$	1	$\frac{ L - d_{dist} }{\sqrt{3}}$

f) Incerteza-padrão

A incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída y é dada pela seguinte expressão:

$$u(y) = \sqrt{u(ref_{HP})^2 + u(cos)^2 + u(q)^2 + u(e)^2 + u(r)^2 + u(ali_{dist})^2}$$

g) Incerteza expandida

A incerteza de medição expandida é resultante da multiplicação da incerteza-padrão $u(y)$ da grandeza de saída y por um factor de expansão k .

$$U = u(y) \times k$$

A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza padrão multiplicada pelo factor de expansão $k = 2$, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de, aproximadamente, 95%. A incerteza foi calculada de acordo com o documento "Guia para expressão da incerteza de medição nos Laboratórios de Calibração", (IPQ, 2ª Edição, Dezembro 2005).

h) Apresentação de resultados

O certificado de calibração deverá apresentar resumidamente o método e a sequência apresentada neste procedimento técnico, tal como a gama de valores nominais ensaiada, o erro de medição, e a consequente incerteza de medição expandida.

Anexo F: Desenhos do Projecto do Equipamento de Medição de Longo Alcance

